

5
200



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

REHABILITACION DE ACUIFEROS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A N ;

LINO ENRIQUEZ MOCTEZUMA

OSCAR LEON VAZQUEZ

MIGUEL ANGEL MOLINA AYALA

MEXICO, D. F.

1993

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

REHABILITACION DE ACUIFEROS

Página

1.- INTRODUCCION	
1.1.- Antecedentes	2
1.2.- Objetivo	11
1.3.- Contenido	11
1.4.- Metodología	14
2.- CAUSAS DE LA REHABILITACION	
2.1.- Definición	17
2.2.- Daños producidos al acuífero	17
2.3.- Efectos a corto y a largo plazos	19
2.4.- Variaciones climáticas	25
3.- SALINIZACION Y CONTAMINACION	
3.1.- Intrusión salina	27
3.1.1.- Ghyben - Herzberg	28
Longitud de la zona de invasión del agua salada	30
3.1.2.- Aproximación hidrodinámica de Hubbert	32
3.1.3.- Control de la intrusión salina	34
3.2.- Cuerpos salinos	39
Aportación de sales de las zonas de riego	41
3.3.- Desechos superficiales	42
3.3.1.- Contaminación por vertederos	44
3.3.2.- Contaminación por actividades domésticas	46
3.3.3.- Contaminación por labores agrícolas	47
3.3.4.- Contaminación por vertido de aguas residuales en el subsuelo	48
3.3.5.- Contaminación por derivados del petróleo	49
3.3.6.- Contaminación por desechos radiactivos	55
3.4.- Desechos subterráneos	56
Tipos de líquidos residuales que se inyectan	56
3.5.- Mecanismos de contaminación	57
Desarrollo hidrológico de la contaminación	58
3.6.- Difusión y dispersión hidrodinámica	59
3.7.- Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación	64

3.8.-	Calidad del agua	72
3.8.1.-	Sólidos disueltos	77
3.8.2.-	Gases contenidos en las aguas subterráneas	77
3.8.3.-	Materia en suspensión	78
3.8.3.1.-	Materia inorgánica	78
3.8.3.2.-	Materia orgánica	79
3.8.4.-	Clasificación de las aguas	80
3.8.4.1.-	Clasificación por el contenido de sólidos totales disueltos (STD)	81
3.8.4.2.-	Clasificación por iones dominantes	81

4.- SOBREEXPLOTACION Y HUNDIMIENTO

4.1.-	Elementos del balance volumétrico	83
4.2.-	Sobreexplotación acuífera	90
4.2.1.-	Alternativas para evitar problemas en los acuíferos a causa de la sobreexplotación	100
4.2.2.-	Alternativas de explotación	103
4.3.-	Porosidad y permeabilidad	104
4.3.1.-	Mecanismos que gobiernan la variación de la porosidad y Permeabilidad	108
4.3.1.1.-	Mecanismos naturales	109
4.3.1.2.-	Mecanismos inducidos	113
4.4.-	Hundimiento y fracturamiento	113
4.4.1.-	Mecánica del hundimiento	116
4.4.2.-	Fracturamiento	120
4.4.2.1.-	Modos de agrietamiento	121
4.4.2.2.-	Esfuerzos ejercidos en la formación	123
4.4.2.3.-	Formación de la fractura	127
4.5.-	Elasticidad del acuífero	128

5.- METODOLOGIA DE LA REHABILITACION

5.1.-	Estrategias para la rehabilitación de acuíferos	135
5.1.1.-	Actividades preliminares	135
5.1.2.-	Desarrollo de alternativas	150
5.1.3.-	Evaluación y selección de alternativas y estrategias de restauración de acuíferos	162
5.2.-	Limpieza por extracción	173
5.2.1.-	Sistemas de pozos	173
5.2.2.-	Sistemas interceptores	185
5.2.2.1.-	Construcción	186
5.2.2.2.-	Diseño	190

5.3.-Tratamiento in-situ	196
5.3.1.- Tratamiento químico	196
5.3.2.- Tratamiento biológico in-situ	197
5.3.3.- Tratamiento de agua subterránea	206
5.3.4.- Proceso CESAR	209
5.3.4.1.- Problema de contaminación	209
5.3.4.2.- Métodos de descontaminación	211
5.4.- Recarga artificial	217
5.4.1.- Métodos de recarga	218
5.4.2.- Sistemas de recarga en superficie	219
5.4.3.- Sistemas de recarga a través de pozos verticales	224
5.4.4.- Sistemas mixtos de recarga	225
5.4.5.- Proyecto y análisis de recarga artificial	226
5.4.6.- Consideraciones para el proyecto	226
5.5.- Sellado e impermeabilización por cementación	231
5.5.1.- Control del agua superficial, cubiertas y revestimientos	231
5.5.2.- Láminas piloteadas	249
5.5.3.- Cementación	251
5.5.4.- Paredes impermeables	262
5.6.- Rehabilitación de obras hidráulicas	273
6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	287
BIBLIOGRAFIA	291

1- INTRODUCCION

México enfrenta graves problemas relacionados con el agua subterránea, mismos que son de gran importancia debido a que crean alteraciones tanto en la calidad como en la cantidad del agua disponible para un uso determinado como industria, agricultura o doméstico.

El primero consiste en la contaminación excesiva que sufren algunos acuíferos, originada por la presencia de fluidos o sustancias indeseables, que alcanzan los depósitos de las aguas subterráneas. Estos fluidos tienen su origen en el vertido indiscriminado de aguas residuales industriales, en el uso de fertilizantes en la agricultura, en la lixiviación de basureros, desechos de fosas sépticas, cañerías o tanques de almacenamiento rotos.

El segundo problema que afecta la utilización de los acuíferos es la extracción excesiva que están sufriendo, principalmente en zonas desérticas o semi-desérticas, en los cuales se ha alcanzado, o se prevee que rebase la recarga permanente extrayendo el agua que está almacenada en el acuífero.

El problema de la sobreexplotación provoca efectos tales como: el abatimiento progresivo de los niveles de agua, la disminución del rendimiento de las captaciones, el hundimiento del terreno, la disminución en la capacidad de almacenamiento, el incremento de los costos de bombeo, la formación de grietas y la intrusión salina en

acuiferos costeros.

Conociendo los daños que se están presentando en la mayoría de los acuiferos de México, y dada la importancia que tienen de permitir el almacenamiento y la circulación del agua, es necesario dedicarle mayor atención a su adecuado manejo y operación e implantar técnicas enfocadas a la rehabilitación de acuiferos, a las condiciones "originales" que fueron alteradas por la contaminación y la sobreexplotación del agua, con el propósito de reducir la magnitud de los efectos y prolongar la vida útil de los acuiferos.

En el presente trabajo se propone una serie de métodos o actividades cuyo objetivo principal es reducir los efectos presentes en el acuífero, los cuales amenazan su vida útil. Se persigue lograr un equilibrio, para lo cual es recomendable determinar qué tipo de problema prevalece en el medio y con ello proponer alternativas que permitan prevenir o disminuir sus efectos.

1.1.- ANTECEDENTES

En México, la importancia del agua subterránea se deriva principalmente de condiciones climatológicas adversas en más del 50% del territorio nacional, donde impera un clima desértico o semi-desértico, el recurso hidráulico es escaso y transitorio en la superficie; consecuentemente, el subsuelo es la principal y a menudo la única fuente de abastecimiento.

La explotación intensiva del agua subterránea en México se inició a partir de 1950, año a partir del cual se crearon los más importantes

Distritos de Riego del país en los que se obtiene el 50% de la producción agrícola; sin embargo, en ese entonces no se contaba con la tecnología adecuada para determinar el comportamiento de los acuíferos y, a raíz de ello, su aprovechamiento se efectuó sin control, siguiendo únicamente la política de satisfacer las necesidades que generaba el desarrollo de las zonas agrícolas.

De entonces a la fecha, nuestro país experimentó un rápido desarrollo: floreció la agricultura, la industria cobró importancia y se aceleró el crecimiento demográfico en forma explosiva. Para sustentar este desarrollo, el aprovechamiento de los recursos hidráulicos tuvo que progresar al mismo ritmo; en particular, las fuentes subterráneas cobraron importancia en pocos años, hasta convertirse en factor determinante del desarrollo en todos los sectores.

En general, las aguas subterráneas, por su permanencia y amplia distribución espacial, ofrecen, en condiciones naturales, una gran seguridad contra la contaminación, pero desgraciadamente son alcanzadas a menudo por diversos contaminantes, ya sea de manera natural, por el manejo del acuífero, o por actividades humanas.

El caso más común de contaminación de aguas subterráneas en el país se debe al alcance de los acuíferos por desechos humanos. La infiltración de ciertas sustancias de los drenajes urbanos, a través del suelo, llegan a estos acuíferos contaminándolos, causando graves problemas de salud pública.

También es muy frecuente que en el medio rural se presente este tipo de problemas, ya sea debido al fecalismo a cielo abierto o a la construcción de letrinas sanitarias y fosas sépticas, muchas veces sin

la determinación del nivel freático, el cual debe estar a 1.50 m como mínimo en línea vertical del fondo de la letrina o fosa séptica; cuando exista declive, debe instalarse abajo de la toma de agua subterránea y a unos 15 metros, cuando menos, de la misma.⁴

Otra fuente de contaminación de los mencionados mantos, es generada por la acumulación de diversos tipos de desechos sólidos; las lluvias provocan la disolución de algunos componentes, además de que propician la descomposición de la materia orgánica; se producen, así, líquidos indeseables que, según las condiciones del terreno, pueden filtrarse hasta los mantos acuíferos contaminándolos.

A continuación se darán algunas definiciones que ayudarán a comprender mejor el tema.

Hidrogeología: Es la rama de la Hidrología que trata del agua subterránea, su yacimiento y movimiento, sus recargas y descargas; de las propiedades de las rocas que influyen en su ocurrencia y almacenamiento, así como los métodos empleados para la investigación y utilización.

Acuífero: Es un paquete de roca permeable capaz de transmitir cantidades significativas de agua bajo un gradiente hidráulico.

Acuícludo: Es un paquete de roca que es incapaz de transmitir cantidades significativas de agua bajo un gradiente hidráulico.

⁴Vizcaino Muray, Francisco. LA CONTAMINACION EN MEXICO, Ed. Fondo de Cultura Económica. México 1980.

Acuitardo: El término describe los estratos menos permeables en una secuencia estratigráfica. Estos estratos pueden ser lo bastante permeables para transmitir agua en cantidades significativas en el estudio regional del flujo del agua subterránea, pero sus permeabilidades no son suficientes para permitir la terminación de pozos productores dentro de ellos.

Tipos de Acuíferos. - Desde el punto de vista hidráulico los acuíferos pueden clasificarse en tres tipos principales: confinados, semiconfinados y libres.

Un acuífero confinado es aquél que se encuentra delimitado entre dos formaciones impermeables; ocurre a profundidades, y usualmente el nivel del agua dentro de un pozo asciende por encima de la capa confinante.

Si un acuífero está limitado por formaciones menos permeables que él mismo, pero a través de las cuales puede recibir, o ceder, volúmenes significativos de agua, se le llama "acuífero semiconfinado".

En los pozos terminados en acuíferos confinados o semiconfinados, el nivel del agua asciende arriba de la capa confinante. La superficie imaginaria definida por los niveles del agua en los pozos que penetran este tipo de acuíferos, recibe el nombre de "superficie piezométrica"; sus variaciones corresponden a cambios de presión a la que está sometida el agua en el acuífero.

Un acuífero libre es aquél donde el agua subterránea tiene una superficie libre abierta a la atmósfera que se denomina nivel freático y corresponde al límite superior (FIG. 1.1).

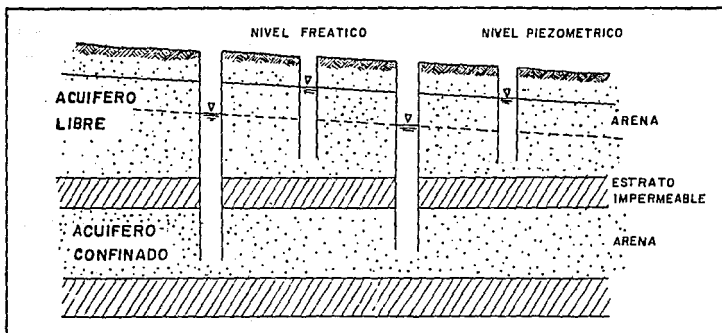


FIG. 1.1.- ACUÍFERO LIBRE Y SU NIVEL FREÁTICO; ACUÍFERO CONFINADO Y SU NIVEL PIEZOMÉTRICO, (Referenci)

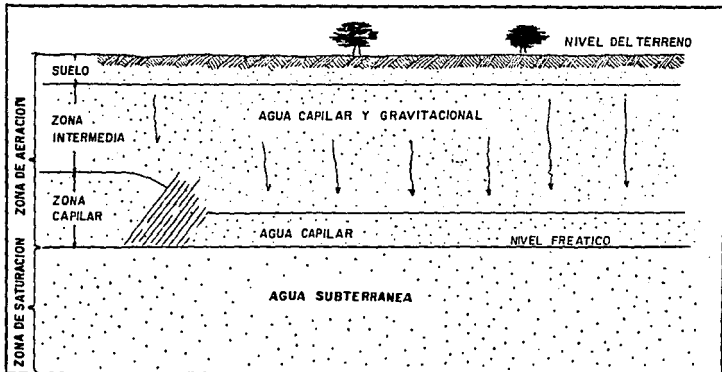


FIG. 1.2.- DISTRIBUCION DE AGUA EN EL SUBSUELO, (Referencia 14).

Zona de aeración o zona no saturada. - Comprendida entre la superficie del terreno y del nivel freático, está parcialmente saturada y se subdivide en zona de agua del suelo, zona intermedia y zona capilar. En la primera zona, constituida por suelo y otros materiales, el contenido de agua varía continuamente y está influenciado por lluvia, riego, drenaje y evapotranspiración. La zona capilar se encuentra inmediatamente arriba del nivel freático; su altura depende de la granometría del material y de las fluctuaciones de dicho nivel; en materiales finos la altura capilar puede ser de varios metros, pero el agua asciende lentamente; en materiales gruesos la altura capilar es del orden de centímetros. Entre la zona de agua de suelo y la capilar, se encuentra la zona intermedia que contiene agua, llamada vadosa, agua suspendida o pelicular adherida a los granos y, temporalmente, agua gravitacional que fluye verticalmente hacia la zona saturada, durante los periodos de infiltración (FIG. 1.2).

Zona saturada. - Se sitúa por debajo de la superficie freática, todos los poros se encuentran llenos de agua y es a la que se le llama agua subterránea, la cual se encuentra a mayor presión que la atmosférica. (FIG. 1.2).

Porosidad: La porosidad se define como:

$$n = \frac{V_p}{V_T} \quad (1.1)$$

donde n es la porosidad, V_p es el volumen de poros de la roca y V_T es el volumen total de la roca.

Esta se reporta usualmente como fracción decimal o en porcentaje.

Si se toman en cuenta en V_P tanto los poros aislados como los comunicados entre sí, a n se le llama porosidad absoluta. La porosidad efectiva es la que se tiene considerando únicamente los poros comunicados.

Por otra parte la porosidad puede ser primaria o secundaria, siendo la primera la que se presenta como resultado de los procesos originales (deposición, compactación, etc.) de formación del medio poroso. La porosidad secundaria es aquella que se debe a procesos posteriores que experimenta el mismo medio, por ejemplo fracturamiento, disolución o recristalización.

Grado de Saturación. - Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de poros de la muestra.

$$G = \frac{V_v}{V_P} \quad (1.2)$$

donde:

G = Grado de saturación

V_v = Volumen de agua

V_P = Volumen de poros

Contenido Volumétrico de Humedad:

$$c = \frac{V_v}{V_T} \quad (1.3)$$

donde:

c = Contenido volumétrico de humedad

V_v = Volumen de agua

V_T = Volumen total de la muestra

Rendimiento Específico. - Se define como el cociente entre el volumen de agua que el material saturado desaloja por gravedad y el volumen total de sólidos con sus intersticios saturados. Es decir:

$$S_y = \frac{V_g}{V_T} \quad (1.4)$$

donde:

S_y = Rendimiento específico

V_g = Volumen de agua drenado por gravedad

V_T = Volumen total

Retención Específica. - Se define como el cociente entre el volumen de agua que retiene el suelo saturado, en oposición al efecto de drenaje por gravedad, y el volumen total. Es decir:

$$S_r = \frac{V_r}{V_T} = n - S_y \quad (1.5)$$

donde:

S_r = Capacidad de retención específica

V_r = Volumen de agua retenido en oposición al drenaje gravitatorio, principalmente a consecuencia de la atracción molecular.

V_T = Volumen total

n = porosidad efectiva

Coefficiente de Almacenamiento (S)..- Definido como la cantidad de agua liberada por una columna de área horizontal unitaria y altura igual al espesor saturado del acuífero, cuando la carga hidráulica decrece una unidad. Es un coeficiente adimensional.

Coefficiente de Almacenamiento Especifico (Ss): Se define como la cantidad de agua liberada por unidad de volumen de material, cuando la carga hidráulica decrece una unidad (FIG. 1.3).

$$S = S_s b ; \quad b = \text{espesor del acuífero} \quad (1.6)$$

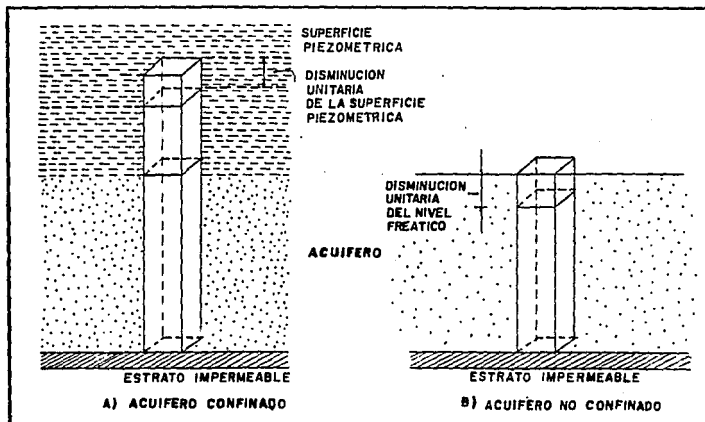


FIG. 1.3 DEFINICION DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO, (Referencia 18).

1.2.- OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es presentar medidas para prevenir o corregir los daños ocasionados a los acuíferos por la contaminación o la sobreexplotación, mediante métodos y técnicas enfocadas a la restauración de los mismos, a ciertas condiciones que permitan el aprovechamiento del agua subterránea.

1.3.- CONTENIDO

La estructura del trabajo se presenta de la manera siguiente: en primer lugar, se mencionan los daños que pueden presentarse en el acuífero y sus efectos a corto o a largo plazo, en segundo lugar se desarrollan ampliamente las causas del daño, principalmente por contaminación y sobreexplotación; por último se plantea la metodología para la restauración del acuífero y los métodos utilizados para tal fin.

CAPITULO 1.- INTRODUCCION

En este capítulo se mencionan algunos antecedentes sobre la rehabilitación de acuíferos y conceptos básicos para que el lector tenga un panorama más amplio sobre el tema.

Se plantea un objetivo, el cual se pretende cumplir en la realización de la tesis de rehabilitación de acuíferos. Además se propone una metodología para la protección y tratamiento de los acuíferos.

CAPITULO 2.- CAUSAS DE LA REHABILITACION

Se define que es la rehabilitación de acuíferos y se mencionan las principales causas que provocan daño a los acuíferos como la contaminación y la sobreexplotación. Los efectos a corto y a largo plazo resultantes a consecuencia de estos daños. También se hace mención como las variaciones climáticas intervienen en las causas debido a que estas tienen gran relación con el ciclo hidrológico y a su vez con la recarga de los acuíferos.

CAPITULO 3.- SALINIZACION Y CONTAMINACION

Se inicia con la exposición del tema de la intrusión salina dando la definición, métodos para calcular la intrusión salina (Ghyben - Herzberg y Aproximación hidrodinámica de Hubbert), y control de la intrusión salina. Después se trata el tema de los cuerpos salinos como afectan a las aguas subterráneas; continuando con la exposición de las fuentes de contaminación, que aquí las dividimos en desechos superficiales y desechos subterráneos dando en cada una la forma en que se crea la contaminación en las aguas subterráneas. Por último se presentan las normas de calidad que debe de cumplir el agua para los distintos tipos de usos a los cuales se haya destinado el agua.

CAPITULO 4.- SOBREEXPLOTACION Y HUNDIMIENTO

Para tratar el tema de este capítulo es necesario tener conocimiento de los elementos que integran un balance volumétrico para estimar los volúmenes de agua de entrada, salida y la variación del almacenamiento de un acuífero. Con lo anterior será posible determinar si existe o no sobreexplotación en una determinada región y si ésta

existe, proponer alternativas que eviten los problemas que acarrea la sobreexplotación en los acuíferos y alternativas para una mejor explotación del recurso hidráulico.

El almacenamiento de un acuífero está íntimamente ligado principalmente con dos elementos que constituyen la estructura del acuífero, que son: la porosidad y la permeabilidad, los cuales sufren variaciones debido a diferentes mecanismos, como pueden ser el hundimiento y el fracturamiento, problemas asociados con la sobreexplotación.

CAPITULO 5.- METODOLOGIA DE LA REHABILITACION

En este capítulo, se describen los pasos a seguir para la decisión y elaboración de las alternativas en la rehabilitación de acuíferos, desde la selección del grupo multidisciplinario encargado de la realización del trabajo hasta la selección de la alternativa final, pasando por la definición del problema, estudios preliminares, planteamiento del objetivo, selección de las posibles alternativas y la evaluación de cada una; que posteriormente se describen ampliamente para conocer sus ventajas y desventajas de cada una de las diferentes alternativas posibles al llevar a cabo la rehabilitación de acuíferos.

CAPITULO 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta parte se presenta las metas alcanzadas del trabajo, las ideas más importantes y el porque se debe de realizar la rehabilitación de un acuífero. También se proponen algunas recomendaciones en algunos puntos en los cuales nosotros creemos pertinente hacer mayor énfasis para tener mayor éxito en la

rehabilitación de acuíferos y aprovechar mejor el recuso hidráulico.

1.4.- METODOLOGIA

En la tabla 1.1 se dan las metodologías utilizadas para la protección y tratamiento de los acuíferos según el problema de contaminación, si es agudo o crónico. Una contaminación aguda puede ocurrir por el vertido accidental durante el transporte de sustancias químicas o materiales no deseables. La contaminación crónica en un acuífero puede ocurrir por numerosos eventos y puede involucrar contaminantes tradicionales tales como nitratos y bacterias o únicamente contaminantes como gasolina, metales o químicos.

La metodología para controlar la contaminación del agua subterránea debe ser considerada en términos del objetivo, ya sea la disminución del contaminante o la restauración del acuífero. La disminución de la contaminación se refiere a la aplicación de metodologías que ayuden en la prevención del movimiento del contaminante hacia el agua subterránea, también llamada manejo de la pluma. La restauración del acuífero se refiere a la restauración de la calidad del agua afectada, usualmente por remoción de la fuente de contaminación y por tratamiento del agua contaminada.

Un proyecto de limpieza involucrará el uso de diversas metodologías en combinación. Por ejemplo, para un problema agudo, pueden ser usadas la excavación del terreno y relleno con sólidos limpios, en combinación con pozos de extracción, tratamiento de agua contaminada y descarga en superficies de drenajes. Para un proyecto de limpieza de contaminación crónica se incluyen metodologías de cubiertas de superficie, barreras subterráneas y tratamiento químico

en el sitio.

Tabla 1.1.- Metodología para protección y tratamiento de la calidad del agua subterránea (Referencia 9).

Contaminación	Objetivo	Metodología
Agudo	Remoción	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Fijación química en el sitio. 2.- Excavación de suelos contaminados con subsecuencia de relleno con suelos limpios.
	Rehabilitación	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Pozos de extracción, tratamiento del agua subterránea y recarga. 2.- Pozos de extracción, tratamiento del agua subterránea y descarga a superficies de drenaje. 3.- Pozos de extracción y descarga a superficies de drenaje.
Crónico	Remoción	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Fijación química en el sitio 2.- Excavación del sólido contaminado con subsecuencia de relleno con suelos limpios. 3.- Zanjas de intercepción para colectar el agua contaminada como ésta se mueve lateralmente del sitio. 4.- Cubriendo superficies con material impermeable para inhibir la infiltración del lixiviado producido por precipitación. 5.- Barreras subterráneas de materiales impermeables para restringir el flujo desde la fuente. 6.- Modificar modelos de bombeo en pozos de extracción. 7.- Inyectar agua fresca en una serie de pozos colocados alrededor de la fuente o pluma contaminante para desarrollar presiones elevadas para restringir el movimiento de contaminantes
	Rehabilitación	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Pozos de extracción, tratamiento del agua subterránea y recarga. 2.- Pozos de extracción, tratamiento de agua subterránea contaminada y descarga a superficies de drenaje. 3.- Pozos de extracción y descarga a superficie de drenaje. 4.- Tratamiento químico en el sitio 5.- Tratamiento biológico en el sitio

No

Existe

Página

2.- CAUSAS DE LA REHABILITACION

2.1.- DEFINICION

La rehabilitación de acuíferos es el conjunto de aquellas actividades encaminadas a la restauración de los embalses de aguas subterráneas a ciertas condiciones en las cuales todavía es posible el aprovechamiento del recurso hidráulico, debido a que los daños ocasionados por la contaminación y/o la sobreexplotación no han sido permanentes.

2.2.- DAÑOS PRODUCIDOS AL ACUIFERO

La problemática de las aguas subterráneas plantea tres aspectos principales: sobreexplotación, contaminación y uso competitivo.

En la época en que se inició el aprovechamiento de los acuíferos en gran escala prácticamente se carecía de estudios acerca de sus características y renovación. Este desconocimiento dió lugar a que se sobreestimara el recurso hidráulico disponible en el subsuelo; y así, bajo la presión de las necesidades de agua, se inició la sobreexplotación de algunos acuíferos. El descenso progresivo de los niveles de agua fue el efecto inmediato, y de éste se derivaron el incremento de los costos de bombeo, la inutilización de captaciones y

la disminución de su rendimiento, la intrusión salina en los acuíferos costeros, la formación de grietas y el asentamiento del terreno.

Varios de los casos tristemente célebres de sobreexplotación son: la Región Lagunera, en los Estados de Coahuila y Durango; la Costa de Hermosillo, el Valle de Guaymas y la cuenca del Río Magdalena (Caborca), en el Estado de Sonora; el Valle de Santo Domingo, en Baja California Sur; los Valles de León y Celaya, en Guanajuato. En todas estas zonas, los efectos perjudiciales mencionados han progresado en tal forma que su economía está seriamente amenazada. En las regiones áridas del país la sobreexplotación se ha convertido en la condición hidrogeológica más generalizada.

Ciertamente, las fuentes de agua subterránea son menos vulnerables a la contaminación que las superficiales. Sin embargo, esto no significa que la calidad del agua de aquéllas esté salvaguardada de todo deterioro; por el contrario, cada vez son más numerosos los casos de contaminación de acuíferos. En algunos de ellos, la contaminación es un efecto colateral de la sobreexplotación, como sucede en los acuíferos costeros; en muchos otros, la contaminación tiene otro origen; la infiltración excedente de riego en las zonas agrícolas o el desecho de las aguas negras y residuales en las zonas urbanas e industriales.

La escasez del recurso en relación con su creciente demanda ha originado una competencia destructiva entre los diferentes sectores por su aprovechamiento prioritario. Por ejemplo: siendo el consumo humano el uso de primera prioridad, las ciudades están acaparando las fuentes circunvecinas para su establecimiento, con frecuencia a costa de la agricultura; los desarrollos industriales, preferentemente

establecidos en las proximidades de los grandes asentamientos humanos, están complicando el abastecimiento de agua de éstos; la explotación intensiva de los acuíferos para abastecer a los grandes desarrollos, está interfiriendo o agotando colectivamente a las captaciones del sector rural, en fin, unos sectores se desarrollan a costa de otros, o todos prosperan temporalmente a costa de un recurso agotable.

2.3.- EFECTOS A CORTO Y A LARGO PLAZO

Antes de continuar, es recomendable, identificar cada uno de los efectos que dañan al sistema, los cuales se pueden dividir en tres grupos de acuerdo a la causa por la cual fueron originados.

1.-Contaminación

Desechos

Superficiales

Subterráneos

Intrusión marina

Cuerpos salinos

2.-Sobreexplotación

Descenso de niveles piezométricos

Hundimiento del terreno

Fracturamiento de la formación

3.- Obras
hidráulicas

Colmatación
Arenamiento
Incrustación
Corrosión
Ruptura de cementaciones y/o
tuberías

1.- Primer grupo: *Contaminación*. Las aguas subterráneas pueden sufrir una contaminación directa, sin dilución, cuando se introducen directamente las sustancias contaminantes en el acuífero, tal como el vertido en pozos de inyección o en pozos negros, o bien una contaminación indirecta, con dilución, cuando esta se produce por contaminación de la recarga natural o por entrada de aguas contaminadas debido a la alteración de las condiciones hidrodinámicas preexistentes, tales como las producidas a causa de bombeos, drenajes. En algunos casos pueden participar ambos conceptos (FIG. 2.1).

El efecto de la alteración de la calidad del agua debido a la contaminación, se puede situar en el tiempo a corto plazo, cuando la fuente se encuentra muy cercana al acuífero o las propiedades hidrodinámicas son muy favorables. A largo plazo, cuando no se cumplan las condiciones anteriores.

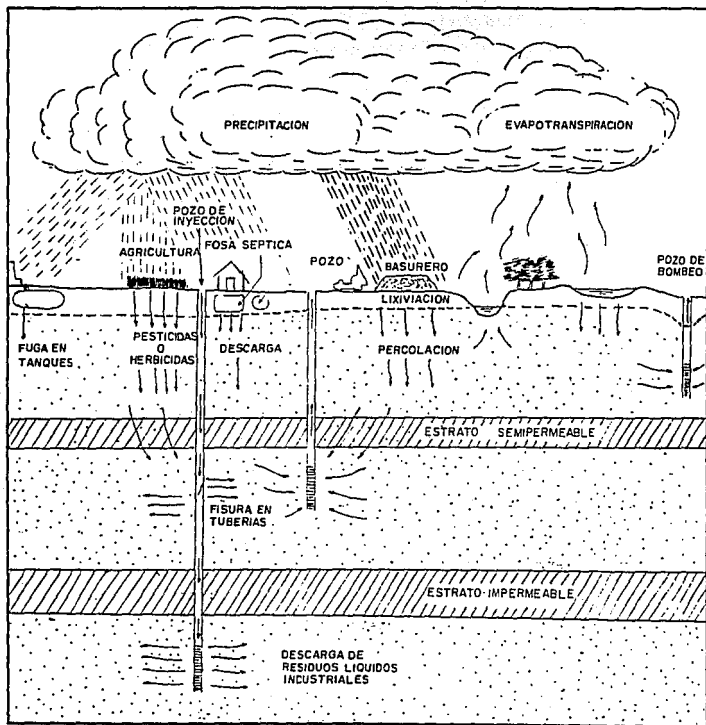


FIG. 2.1 CONTAMINACION DE AGUAS SUBTERRANEAS, (Referencia II).

2.- Segundo grupo: *Sobreexplotación*. La sobreexplotación de los acuíferos se presenta, cuando los pozos se someten a un excesivo bombeo, donde los volúmenes de extracción son mayores a los volúmenes de recarga del acuífero; ocasionando que los niveles del agua se abatan, lo que trae como efectos colaterales incremento en los costos de bombeo, intrusión de agua de mar en acuíferos costeros, asentamiento de terrenos, formación de grietas y migración de aguas de mala calidad.

3.- Tercer grupo: *Obras hidráulicas*. Una obra hidráulica es aquella que involucre un conjunto de técnicas especializadas, cuyo objetivo es la interrelación del hombre con el agua para su aprovechamiento equitativo y racional.

Existen factores que intervienen en forma negativa dentro del funcionamiento de las obras hidráulicas, cuyos efectos se pueden presentar a corto plazo y largo plazo, destacando principalmente: la colmatación, el arenamiento, la incrustación (bacteriana y química), la corrosión y la ruptura de cementaciones y/o tuberías.

La colmatación se presenta, cuando ocurre una reducción progresiva de permeabilidad, debida a depositación de sólidos en suspensión, a la aparición de lodos orgánicos creados por microorganismos (incrustación bacteriana) y a incrustación química; la cual se origina debido al intercambio iónico, que puede darse por variaciones de presión y temperatura, por el contacto entre tubería y el agua subterránea o por la presencia de aguas incompatibles.

Otro factor que influye considerablemente en el mal funcionamiento de una obra hidráulica es la *ruptura de tuberías y/o cementaciones de los pozos*. Las primeras manifestaciones se observan

cuando el caudal de extracción o de inyección, disminuye a causa de la fuga de agua a través de canalizaciones, fisuras, y orificios en la tubería.

El problema se origina ya sea por mal trabajo de cementación, mal diseño de las tuberías, inadecuado manejo de presiones o por el hundimiento del terreno.

Otra manifestación es cuando la calidad del agua es alterada debido a la invasión de un fluido indeseable de la formación al pozo.

Por otro lado, el arenamiento se define como el acarreo y depositación de material arenoso en el fondo del pozo. Este es otro factor que repercute en la vida útil de la obra, pues afecta principalmente a las instalaciones del equipo en forma abrasiva y a la vez disminuyendo progresivamente el flujo en la cara de la formación productora. La acumulación de arena está en función del tipo de formación y del ritmo de producción.

La corrosión se define como una actividad química sobre los materiales, ejercida por agentes externos, lo que a su vez causa que el material sea carcomido o destruido.

La gravedad de una falla prematura del pozo debida a la corrosión puede apreciarse a través de los gastos que ella implique. Estos factores incluyen, no sólo los costos de rehabilitación, o reposición de la estructura del pozo, sino también de los inconvenientes producidos por una interrupción del abastecimiento de agua, durante el tiempo en que el pozo pudiese estar fuera de servicio.

La presencia de agua hace posible el proceso de corrosión. Esto se debe a que el agua permite el flujo de corriente electrolítica debido a que contiene sales disueltas como cloruros, sulfatos o gases

disueltos como sulfuro de hidrógeno (H_2S), bióxido de carbono, bióxido de azufre y oxígeno.

El uso de dos o más tipos diferentes de metales, como por ejemplo, acero inoxidable y acero ordinario, o acero y latón o bronce, debe evitarse siempre que sea posible, porque al conectarse dos metales diferentes entre sí y sumergidos en el agua, se crea una celda galvánica.

La corrosión, puede ocurrir en las rejillas del pozo, así como en el revestimiento de éste. Puede ser más crítica en las rejillas, ya que en estas se alcanzan proporciones de daño mucho antes que en el entubado. Esto se debe a que solamente se requiere un pequeño agrandamiento de las aberturas de la rejilla para permitir la entrada de arena a través de ella, mientras que el espesor total del entubado de metal debe ser penetrado para ocasionar una falla de revestimiento por corrosión, dañando un pozo del mismo modo que una falla en la rejilla, dando lugar a la introducción de barro y agua contaminada.

El acero ordinario y el hierro no resisten la corrosión. Sin embargo, existe cierto número de aleaciones de metal con varios grados de resistencia a la corrosión. Entre estos se encuentran los aceros inoxidables, que combinan el níquel y el cromo con el acero y también varias aleaciones basadas en cobre, tal como el latón y el bronce combinan huellas de silicón, zinc y manganeso con el cobre. Los fabricantes, mediante el análisis de agua, pueden aportar consejos sobre el tipo de metal o aleaciones de metal que deban usarse.

El tubo de plástico del tipo de cloruro de polivinilo (PVC) es una posibilidad atractiva para sustituir el uso de los metales en pozos pequeños, particularmente bajo condiciones corrosivas. Este

combina resistencia con fuerza adecuada y economía.

2.4.- VARIACIONES CLIMATICAS

Las variaciones climáticas afectan a las aguas subterráneas de acuerdo al cambio de los elementos que conforman al clima, y en el grado en que modifiquen los componentes del ciclo hidrológico, especialmente sobre la evapotranspiración y la precipitación que a su vez, tienen gran influencia sobre la recarga natural de los embalses subterráneos.

La recarga natural está influenciada por los cambios climáticos, los cuales afectan a las variaciones del volumen de agua almacenada en los acuíferos siendo responsables de la mayoría de las grandes fluctuaciones del nivel de las aguas subterráneas.

En el caso de oscilaciones de tipo estacional los hidrogramas de pozos suelen presentar una elevación gradual del nivel de agua durante un período largo de precipitación seguida de un período de descensos generales producido como consecuencia de los bombeos; éste suele ser el caso típico de las zonas de regadíos realizados a base de aguas subterráneas, donde los bombeos están condicionados a las necesidades de las plantas durante la época seca del año. Las fluctuaciones de período largo están originadas por el vaciado o por la recarga natural de los acuíferos (FIG. 2.2).

La FIG. 2.3 muestra el efecto de los cambios en el volumen de agua subterránea almacenada, producidos durante un largo período de tiempo, como consecuencia de los procesos naturales de descarga de los acuíferos.

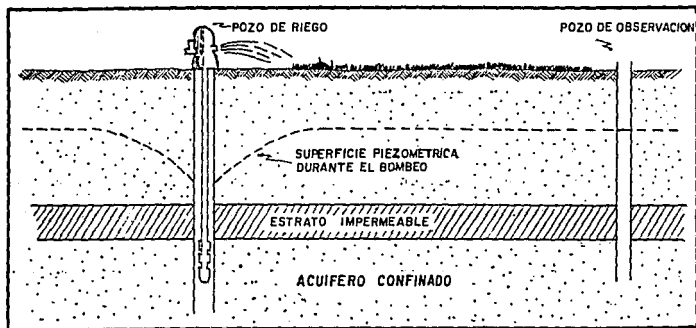


FIG. 2.2 FLUCTUACIONES DEL NIVEL DEL AGUA ORIGINADAS POR LOS BOMBEO EN UN POZO DE IRRIGACION, (Referencia 4).

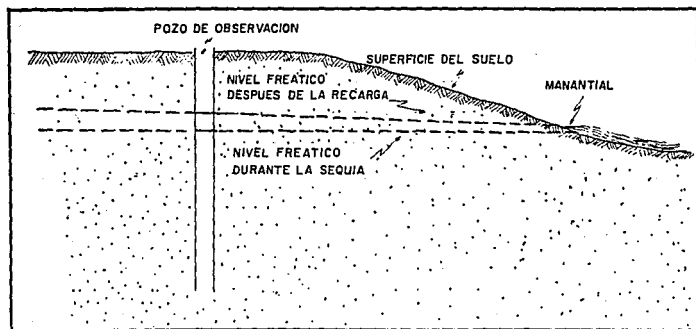


FIG. 2.3 FLUCTUACIONES DEL NIVEL DEL AGUA ORIGINADAS POR DESCARGA DE UN ACUIFERO DURANTE UNA SEQUIA, (Referencia 4).

3.- SALINIZACION Y CONTAMINACION

3.1.- INTRUSION SALINA

La invasión de agua salada, o intrusión salina, es el movimiento de entrada del agua del mar a los acuíferos costeros, libres o confinados y el desplazamiento subsecuente del agua dulce de dichos acuíferos.

Para que una zona costera se vea afectada por la intrusión salina es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes: 1) Continuidad hidráulica y 2) Inversión de gradiente hidráulico, que se genera cuando la carga hidráulica del mar es mayor que la del acuífero; esto sucede si el nivel piezométrico del acuífero es abatido por diversas causas, a profundidades bajo el nivel del mar. Cuando el gradiente es hacia el mar, existe el flujo de agua hacia él, y, en el caso de que dicho gradiente fuera hacia tierra adentro se establecería un flujo de agua hacia el continente.

Es necesario examinar la naturaleza de la interfase agua salada - agua dulce en acuíferos costeros bajo condiciones naturales; dentro de los estudios necesarios para la determinación de la posición de la interfase, es esencial conocer la posición del nivel freático y sus fluctuaciones con el tiempo, así como el registro de los incrementos de salinidad de los pozos. Si se cuenta con estos datos, puede

conocerse la profundidad a la que se encuentra la interfase salina y su respectivo avance con el tiempo; de esta manera sabremos el grado de la peligrosidad de la intrusión salina, planteando posteriormente las alternativas convenientes para su control.

3.1.1.- GHYBEN - HERZBERG

Los primeros estudios sobre la relación agua dulce - agua salada en zonas costeras se realizaron en Holanda y Alemania por Badon Ghyben y Herzberg en el año de 1889. Este principio se estableció con base en las siguientes hipótesis:

- * El flujo de agua dulce es perfectamente horizontal y por lo tanto el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.
- * No existe flujo de agua salada.
- * La interfase salina es un plano, no existiendo zona de mezcla.

Sus análisis asumieron condiciones hidrológicas simples en acuíferos libres; esto muestra (FIG. 3.1) que la interfase separa agua salada de densidad ρ_s y agua fresca de densidad ρ_f , que se proyectará dentro del acuífero en un ángulo $\alpha < 90^\circ$. Bajo condiciones hidrostáticas, el peso de una columna unitaria de agua fresca extendiéndose del nivel freático a la interfase, es balanceada por una columna unitaria de agua salada extendiéndose desde el nivel del mar a cierta profundidad en el punto sobre la interfase. Con referencia en

la FIG. 3.1, nosotros tenemos:

$$\rho_s g z_s = \rho_f g (z_B + z_W) \quad (3.1)$$

donde:

- ρ_s es la masa específica del agua salada;
- g es la aceleración de la gravedad.
- ρ_f es la masa específica del agua dulce;
- z es el nivel freático sobre el nivel del mar

$$z_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} z_W \quad (3.2)$$

Para el caso de que:

$$\rho_s = 1.025 \text{ gr/cm}^3$$

y

$$\rho_f = 1 \text{ gr/cm}^3$$

$$z_s = 40 z_W \quad (3.3)$$

La ecuación (3.3) es posteriormente denominada relación de Ghyben - Herzberg. Por lo que se puede observar que la invasión de agua salada está dada por el nivel freático de las aguas dulces.

Así por ejemplo, un nivel piezométrico de 5 msnm sitúa la superficie de separación agua dulce-agua salada a 200 m de profundidad en la vertical del punto considerado bajo el nivel del mar.

Pero en el análisis matemático se supone que existe un equilibrio hidrostático, por lo que no existe flujo de aguas subterráneas. Sin embargo, en realidad se observa una circulación y esto ha demostrado que la superficie real de separación, es una superficie curva situada

a mayor profundidad que la teórica de Ghyben-Herzberg.

LONGITUD DE LA ZONA DE INVASION DEL AGUA SALADA

Para un acuífero confinado el caudal unitario de las aguas dulces queda representado por :

$$q = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \frac{K b^2}{L} \quad (3.4)$$

donde:

K = permeabilidad

b = espesor de la capa acuífera

L = longitud de la cuña de agua salada

De la que se deduce que la longitud L en aguas dulces es inversamente proporcional al caudal (FIG. 3.2).

Para un manto libre quedaría la expresión para el cálculo del caudal de la siguiente manera :

$$q = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \frac{k H^2}{L} \quad (3.5)$$

Donde H nos representa la potencia de la capa acuífera.

Para poder comprobar la validez de estas ecuaciones, D.K. Todd realizó un modelo a escala.

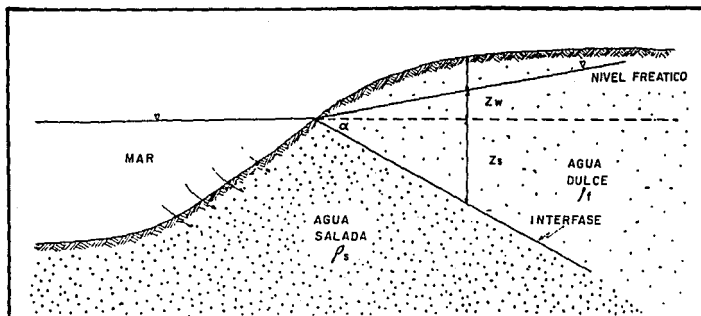


FIG. 3.1 INTERFASE AGUA-DULCE-AGUA SALADA EN UN ACUIFERO LIBRE COSTERO BAJO CONDICIONES HIDROSTATICAS, (Referencia 6).

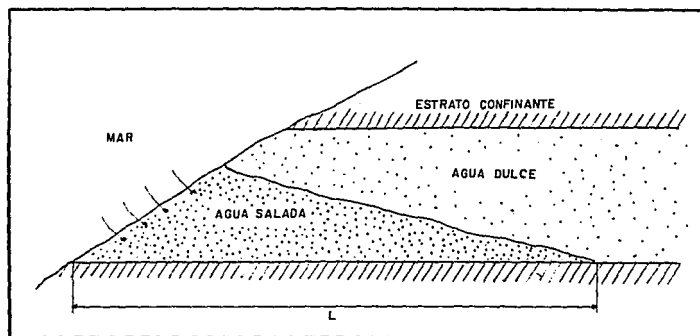


FIG. 3.2 INVASION DE AGUA SALADA EN UN ACUIFERO CONFINADO, (Referencia 3).

3.1.2.- APROXIMACION HIDRODINAMICA DE HUBBERT

Hubbert (1940) logró demostrar la diferencia entre la profundidad real del agua salada y la correspondiente a los cálculos de Ghyben-Herzberg. Para llegar a dicha demostración, partió del equilibrio dinámico de las interfases agua dulce-agua salada.

La pendiente de la interfase puede deducirse por analogía directa, a partir de la siguiente ecuación :

$$\text{sen } \alpha = \frac{\delta z}{\delta s} = \frac{1}{g} \frac{\rho_v}{\rho_v - \rho_l} \frac{\delta \mathfrak{E}_v^*}{\delta s} - \frac{\rho_l}{\rho_v - \rho_l} \frac{\delta \mathfrak{E}^*}{\rho_s} \quad (3.6)$$

Donde: s es la proyección de la interfase en un plano vertical.
 α es el ángulo que forma la proyección con la horizontal.
 \mathfrak{E}^* es la energía de las interfases.

los subíndices r y s , que indican agua dulce y agua salada, reemplazan respectivamente a los subíndices v y l .

Por lo tanto :

$$\text{sen } \alpha = \frac{\delta z}{\delta s} = - \frac{1}{k_f} \frac{\rho_f}{\rho_f - \rho_s} V_{f,s} - \frac{1}{k_s} \frac{\rho_s}{\rho_f - \rho_s} V_{s,s} \quad (3.7)$$

Por hipótesis se considera que el agua salada está en reposo, mientras que el agua dulce fluye sobre ella; entonces $V_{s,s} = 0$ $V_{f,s} \neq 0$. Se deduce que $\text{sen } \alpha > 0$, ya que $\rho_f < \rho_s$, y que α aumenta al crecer $V_{f,s}$, lo cual justifica que α se aproxima a los 90° . (FIG. 3.3)

Además, Hubbert demostró que se mantiene una relación exactamente igual a la siguiente ecuación :

$$Z_{\bullet} = - \frac{\rho_f}{\rho_{\bullet} - \rho_f} Z_v \quad (3.8)$$

Tomando como referencia el nivel medio del mar; Z_v es la altura de la superficie freática sobre dicho nivel, y todas las Z por encima del plano de referencia serán positivas.

En los puntos de intersección de cualquier línea equipotencial del agua dulce con la superficie freática y con la interfase agua dulce-agua salada, como se observa en los puntos A y B de la FIG. 3.3. La distancia vertical entre el nivel freático y la interfase agua dulce-agua salada, será mayor que la obtenida con la ecuación para el cálculo de Z_{\bullet} , debido a que los puntos anteriormente mencionados no están situados en una línea vertical y, adicionalmente que la línea equipotencial es curva.

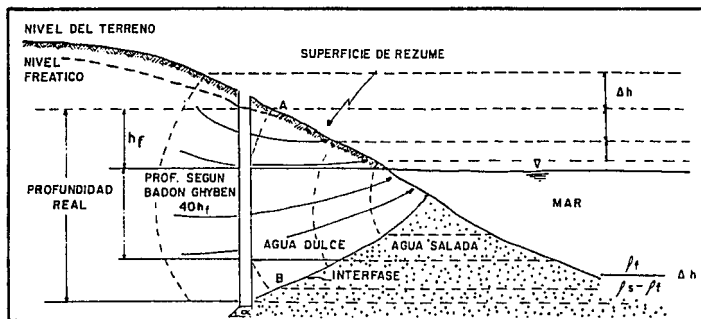


FIG. 3.3 DISCREPANCIA ENTRE LA PROFUNDIDAD REAL DEL AGUA SALADA Y LA CALCULADA POR MEDIO DE LA RELACION GHYBEN-HERZBER, (Referencia 4).

3.1.3.- CONTROL DE LA INTRUSION SALINA

La explotación de acuíferos cercanos a los litorales se debe realizar bajo un control permanente y cuidadoso con el fin de evitar la invasión de las aguas saladas. Existen métodos que ayudan a combatir la intrusión salina, principalmente son los siguientes:

- Modificación de la extracción.
- Recarga artificial.
- Barrera de pozos de bombeo.
- Método combinado.
- Fronteras impermeables.

Modificación de la extracción. - Este método ayuda a combatir en forma directa la invasión del agua salada, el cual consiste en variar adecuadamente el ritmo de extracción o cambiar la localización de los pozos a una cierta distancia del litoral, detrás de la cuña invasora. Sin embargo, el método no detiene la invasión del agua salada, únicamente permite que se mantenga estable (FIG. 3.4).

Recarga artificial. - Este método resulta ser muy eficaz debido a que consiste en el establecimiento de una línea de pozos de inyección, paralela al litoral, para producir un levantamiento en la superficie piezométrica del manto y así poder reducir la cuña invasora, ya que el avance de la superficie interfacial entre el agua dulce-agua salada está determinado por el nivel piezométrico del manto (FIG. 3.5).

Barrera de pozos de bombeo. - Consiste en una línea de pozos localizados entre la zona de explotación del valle y del mar. Los pozos, deben de extraer toda el agua de mar que intrucciona al acuífero, hasta obtener un equilibrio hidrostático. Para ello, los niveles de agua deben ser bajados a la barrera, más que en cualquier otro punto en la cuenca. El volumen de extracción que se lleva en el valle, debe de ser reducido, cuando menos una cantidad ligeramente menor a la que se obtenía antes de aplicar el método. Es importante, disponer del registro de los niveles de agua en la zona de la barrera, así como el conocer la cantidad exacta de agua que se debe bombear para obtener los resultados deseados. Esta cantidad de agua que se debe de extraer, es muy variable y deberá de ser mayor al volumen de

agua de mar que originalmente intrusionaba. Mientras más cerca del mar se localiza la barrera, el bombeo tendrá que ser mayor (FIG. 3.6).

Método combinado. - Este método utiliza la combinación de los dos métodos anteriores. Para ello, la barrera por pozos de bombeo, es localizada entre la línea de costa y la zona de explotación del valle y la barrera por pozo de inyección se ubica tierra adentro, del otro lado de la zona de explotación. La barrera combinada, compuesta de los dos sistemas operando simultáneamente, minimiza los efectos de subsidencia y extracción de agua, así como otros efectos secundarios y permite una mayor flexibilidad en su operación sobre la de uno solo de los sistemas previamente descritos.

Fronteras impermeables. - Consiste en la construcción de una barrera impermeable entre la línea de costa y los pozos de explotación. El medio de construcción puede ser excavando una zanja que posteriormente se rellena con materiales arcillosos. Otro tipo de barrera, constituye en el inyectado de materiales impermeables. Estas construcciones son usadas solo en áreas relativamente someras. Este método tiene la desventaja de no contar con un flujo hacia fuera de la zona, que en ocasiones, es necesario para mantener un balance de sales favorables (FIG. 3.7).

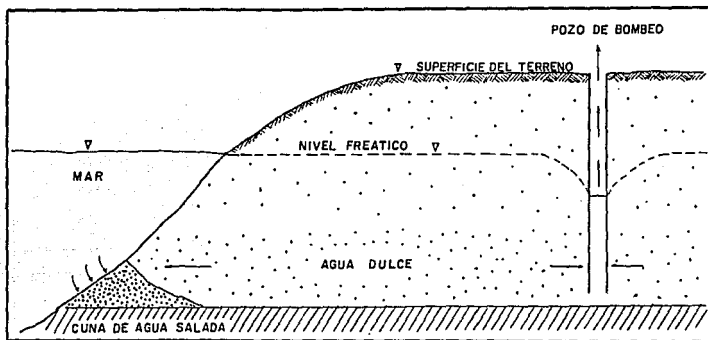


FIG. 3.4 PERFORACION IMPLANTADA LEJOS DE LA ORILLA O MODIFICACION DE LA EXTRACCION, (Referencia 14).

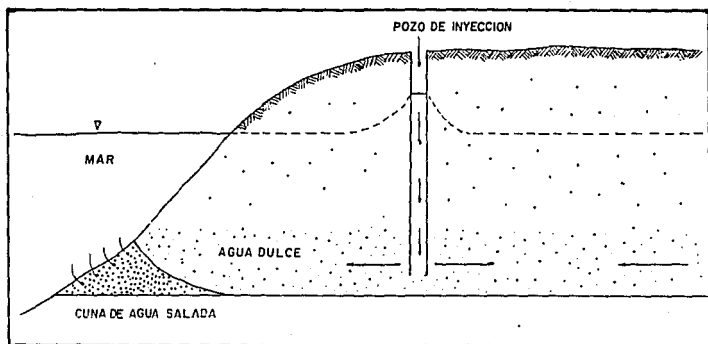


FIG. 3.5 RECARGA ARTIFICIAL, (Referencia 14).

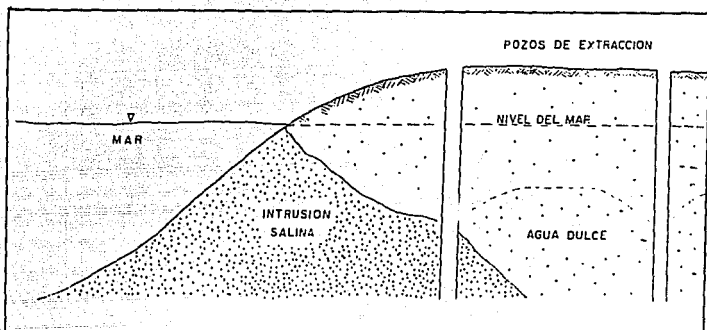


FIG. 3.6 ACUIFERO LIBRE CON BARRERA DE POZOS DE BOMBEO, (Referencia 14).

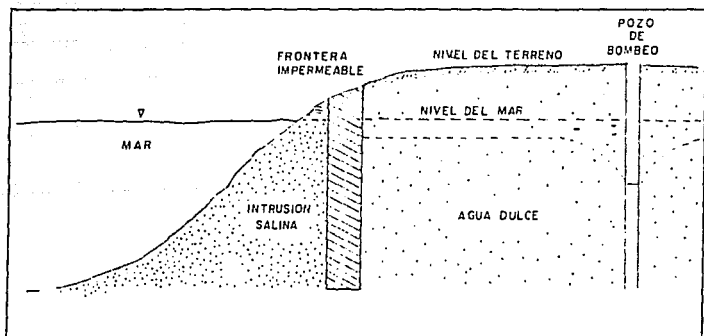


FIG. 3.7 ACUIFERO LIBRE CON FRONTERA IMPERMEABLE, (Referencia 14).

3.2.- CUERPOS SALINOS

El aporte primordial de sales sobre la superficie freática, proviene de zonas de regadío, del lavado de depósitos salinos próximos a la superficie, o bien de la desecación de antiguas lagunas o de costras y depósitos de sales de épocas pasadas, cuyo origen no siempre es fácil de explicar.

Para el análisis de estos cuerpos salinos se requiere conocer la evolución de la composición química de las aguas subterráneas, desde que se produce la recarga hasta el momento de su salida a la superficie, como fuentes y surgencias o extrayéndolas mediante pozos. Se debe tomar en cuenta la influencia que tienen los regadíos y el agua de mar en las zonas costeras, la relación existente entre la litología y la composición del agua.

Un cuerpo salino es aquel que se origina debido a las presiones existentes en la corteza terrestre y que fuerzan a los depósitos salinos normalmente estratificados, a fluir en forma ascendente y lateral adquiriendo una propiedad plástica. Por la presión sobreyacente en dichos estratos, estos tienden a abombarse y en algunas ocasiones a romper los puntos más débiles de los sedimentos que constituyen a un estrato alojado en la parte superior a la formación salina. Según Hobson, « en Alemania es opinión muy extendida que si la sal asciende hasta una zona de circulación de las aguas del subsuelo, los materiales solubles de la parte superior de la columna desaparecerán, dejando una placa más o menos horizontal de

anhidrita , yeso y arcilla ». ¹ La presencia de un 5 a un 10 por ciento de anhidrita en el núcleo de sal. Aunque ambos minerales son relativamente solubles, en comparación con la mayoría de los restantes, la sal es mucho más soluble que la anhidrita. Todo contacto de la superficie de una columna de sal que contiene anhidrita con las aguas subterráneas, conduciría a un enriquecimiento de este último mineral en la zona de contacto.

Las diversas etapas de evolución de las estructuras diapíricas son: juventud, madurez y vejez. La juventud es la etapa del primer movimiento de la sal, cuando sus estratos horizontales fluyen hacia los anticlinales y arquean los sedimentos superyacentes. En la madurez, el techo es roto, comienza el ascenso de la masa de sal y entran en actividad los procesos de disolución en la parte superior de la columna, aumentando la concentración de anhidrita. Durante la vejez continua ascendiendo la masa de sal y aumenta el espesor de su sombrero. La actividad de la disolución se extiende hacia abajo por los flancos de la columna de sal. Puede formarse una cornisa de sal y sombrero. Se desarrollaron sinclinales marginales en las rocas adyacentes. En su extrema sensibilidad desaparece mucha sal por la acción de las aguas subterráneas y el colapso del sombrero provoca hundimientos en el terreno. El ciclo termina cuando se detienen el movimiento ascendente y la disolución.

¹ G. D. Hobson: «Sal Structures: Their Form, Origin, and Relationship to Oil Accumulation» Science of Petroleum (Oxford University Press, 1933), vol. 1, page. 258-259.

APORTACION DE SALES DE LAS ZONAS DE REGADIO

Existen pequeñas diferencias entre la infiltración ocurrida en zonas de regadío, con la recarga proveniente del agua de lluvia.

El agua que es utilizada para el riego tiene diversos orígenes, por lo que resulta ser diferente y aún más salina que el agua de lluvia local, por lo tanto el agua que alcanza el nivel freático es el resultado de una concentración salina proveniente del agua de riego, más las sales que se incorporan mediante procesos que ocurren en el suelo, así como las sales contenidas en los abonos. La salinidad del agua infiltrada depende, pues, de la salinidad del agua de riego y también del método de irrigación, no haciendo menos las condiciones climáticas; en ocasiones serán más salinas que la infiltración natural, mientras que otras veces lo serán menos.

El agua de riego que se infiltra queda en la parte superior del acuífero libre y en ocasiones apenas existe mezcla con el resto del agua subterránea, ya que los fenómenos de mezcla por dispersión y difusión molecular son muy lentos, creándose con éstos, una estratificación del agua con una mayor acumulación salina en la parte superior, parte que debe ser abandonada al establecer captaciones de agua subterránea, buscando aguas más profundas, siempre y cuando con la profundidad no aumente la salinidad por otras razones. Recordando que los tiempos de contacto del agua del acuífero con los materiales que conforman a éste son muy variables, resultando que a mayor tiempo, mayor va a ser la profundidad y menor la permeabilidad, y por eso las aguas profundas suelen ser más salinas que las más próximas a la

superficie, dado que las oportunidades para disolver sales son mayores. Otros factores que favorecen a la cesión de sales, son las elevadas presiones y temperaturas existentes a grandes profundidades.

Las aguas subterráneas al volver a la superficie en forma de ríos o de fuentes, encuentran un ambiente muy diferente, lo cual altera su composición, por ejemplo: las aguas procedentes de ambientes reductores que pierden el hierro disuelto, precipitando hidróxido férrico. Uno de los casos más llamativos de estas precipitaciones es la formación de potentes espesores de travertinos en las surgencias de acuíferos calizos y dolomíticos a consecuencia de la pérdida de CO_2 , que tomaron durante la infiltración. Con el transcurso del tiempo dichas masas de travertino pueden quedar ocultas por otros estratos y en ocasiones, junto con los acomodamientos que sufre la corteza terrestre alojándose en someras o a grandes profundidades, llegando en determinado lapso de tiempo contaminar a las corrientes de agua subterránea que circulen en la región comprendida por dicha masa salina.

3.3.- DESECHOS SUPERFICIALES

El crecimiento de la población y el desarrollo de la industria del país es una de las causas del paralelo incremento de la contaminación de las aguas subterráneas, ya que el agua de los abastecimientos públicos utilizada para fines domésticos supone la evacuación prácticamente del mismo volumen, pero con sus

características alteradas.

La elevación del nivel de vida supone así mismo un aumento del consumo («per capita») y por consiguiente de los caudales vertidos de aguas residuales, en las que se introducen cada vez más sustancias extrañas y de difícil depuración.

Se le da el nombre de contaminantes a los solutos introducidos en el medio hidrogeológico como resultado de las actividades humanas. Para que una sustancia se considere en peligro ambiental debe ser tóxica, persistente y móvil en el medio.

Cabe aclarar que aunque el término contaminación se ha definido en función de la actividad humana, la calidad de las aguas subterráneas también puede alterarse localmente por causas geológicas, como la presencia de cuerpos salinos, intrusión salina, yacimientos minerales y otras causas.

Las principales fuentes de contaminación de las aguas subterráneas se pueden dividir en dos grandes grupos, el primero formado por los desechos superficiales: aguas residuales urbanas, basureros, descargas industriales, principalmente de la industria petroquímica, celulosa y papel, curtiduría, maderera, productos de hule, minería, alimenticia, azucarera y textil; así como la utilización de fertilizantes y herbicidas en la agricultura. El otro grupo son los desechos subterráneos: tal es el caso del almacenamiento de líquidos residuales en el subsuelo.

3.3.1.- CONTAMINACION POR VERTEDEROS

En México la eliminación de basura se realiza de varias maneras: enterrándola, arrojándola en cuerpos de agua superficial, colocándola en depósitos a cielo abierto, o en rellenos sanitarios.

La basura contenida en los ríos puede ser transportada, descompuesta o depositada a lo largo del cauce del río, y los contaminantes que se disuelvan es posible que se infiltren y lleguen a las aguas subterráneas, en el caso de que el río aporte agua al acuífero.

En los rellenos sanitarios la basura se compacta y se cubre con tierra periódicamente. Estos residuos están sujetos a lixiviación por el agua de lluvia que percola, situación similar se tiene en los basureros a cielo abierto y en aquéllos enterrados directamente. El líquido que resulta de la percolación se conoce como lixiviado. Se ha encontrado que contiene una gran cantidad de contaminantes y concentraciones elevadas de sólidos disueltos. Su composición varía según el tipo de basura.

Cuando los depósitos de basura se localizan en materiales relativamente permeables como arena, grava o roca fracturada, el movimiento del lixiviado puede ocasionar que los contaminantes viajen distancias importantes. Si los rellenos sanitarios no tienen comunicación hidráulica con el sistema hidrológico involucrado se puede evitar la contaminación del agua subterránea.

En los vertederos controlados se establecen barreras impermeables para evitar la propagación de la contaminación que en ellos se

origina, depositando la basura tal cual, apisonada, o previamente triturada con capas alternadas de tierra. Sin embargo no siempre se toman las debidas precauciones y en ocasiones ninguna, llegando a depositar la basura en excavaciones, que a veces penetran bajo el nivel del agua; una vez llena la excavación se cubre con tierra quedando aislada del exterior, pudiendo volver a utilizar el terreno para usos agrícolas o de otro tipo. El problema se agrava si se han admitido residuos industriales.

La cantidad del liquido que se produce de vertederos en superficie depende inicialmente de la que contenga la propia basura, pero principalmente del agua de infiltración que recibe de la lluvia y de otros aportes, por ejemplo: escorrentía de terrenos laterales. En un vertedero bien proyectado se evita que la escorrentía lateral lo alcance y se impermeabiliza su superficie. La velocidad con que se producen las reacciones de descomposición depende de la humedad, actividad biológica y de la temperatura, así como del suministro de oxígeno.

El efecto sobre el acuífero depende de la conexión vertical y/o lateral con el vertedero. Por supuesto que la peor situación es aquella en que las basuras entran en contacto con el nivel saturado. El grado de contaminación producido es función de la autodepuración que se puede producir durante la infiltración en el medio no saturado, del suministro de oxígeno, del flujo de agua subterránea y del grado de mezcla con la misma. También depende de la fracción de agua procedente del vertedero que se infiltra; en depósitos enterrados se infiltra toda, pero en depósitos sobre la superficie del terreno una

parte puede escurrir superficialmente.

El agua contaminada del acuífero se puede caracterizar por su mayor mineralización y temperatura, frecuentemente acompañadas por la aparición de color (amarillento oscuro o verdoso), olor desagradable, elevado contenido en ion amonio, posible reducción de sulfatos, ausencia de nitratos, presencia de Fe^{++} y elevado contenido en CO_2 , según sea el pH.

3.3.2.- CONTAMINACION POR ACTIVIDADES DOMESTICAS

Es una contaminación esencialmente orgánica y biológica nacida en fosas sépticas, pozos negros, fugas de sistemas de alcantarillado, vertido indiscriminado de aguas de letrina; utilización cada vez más intensa de productos químicos de uso doméstico (detergentes en sus diversas versiones).

Este tipo de contaminación se da principalmente en lugares donde no existe una red apropiada de desagües, drenaje y colectores; las aguas domésticas o de pequeñas granjas se vierten en pozos negros, fosas sépticas y otras variantes, que de un modo u otro, y con una mayor o menor depuración, permiten que el agua residual se infiltre en el terreno. Cuando el vertido alcanza directamente el acuífero, la depuración es más deficiente, pudiendo ser muy pequeña si se trata de un medio permeable o de un medio kárstico. En general persiste un aumento de salinidad y de contenido de nitratos; los detergentes y otros productos químicos de uso doméstico pueden resultar

especialmente molestos por su baja degradabilidad.

3.3.3.- CONTAMINACION POR LABORES AGRICOLAS

Este tipo de contaminación se debe principalmente a tres aspectos:

- 1) Abonos.- Cuando son a base de estiercol, la contaminación producida es debida al aporte de nitritos. Los abonos artificiales a base de nitratos, fosfatos y potasa pueden producir principalmente una contaminación de nitratos, pues los fosfatos son en general muy poco solubles y la potasa, en la forma química más adecuada, tiende a ser fijada por el terreno si esta bien dosificada.
- 2) Riego.- Contaminación por concentración de sales en el agua de riego excedentaria que se infiltra; este aspecto tiene importancia cuando se trata de regadíos con aguas subterráneas en zonas mal drenadas y/o con escasa recarga natural, donde puede llegarse a tener agua no apta para los cultivos establecidos. También existe una contaminación cuando, en el riego, se toma agua de un río de mala calidad o el riego se realiza con aguas negras.
- 3) Fertilizantes.- El uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas en la agricultura puede ocasionar la degradación de la calidad de las aguas subterráneas. Los fertilizantes naturales y sintéticos aportan principalmente nitratos como

contaminantes. Su presencia se ha detectado principalmente en acuíferos someros, por lixiviación o por deficiencias en la construcción de los pozos. Algunos pesticidas y herbicidas son sustancias sumamente tóxicas aun a bajas concentraciones; al disolverse en el agua de lluvia o riego, pueden llegar a contaminar los acuíferos subyacentes a las tierras de cultivo. En materiales geológicos como arenas y gravas, estos compuestos llegan a tener movilidad importante.

3.3.4.- CONTAMINACION POR VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SUBSUELO

El vertido de aguas residuales en el subsuelo es un método de evacuación, practicado especialmente en pequeñas poblaciones o urbanizaciones aisladas.

1) Aguas residuales domésticas: como ya se mencionó anteriormente, ésta contaminación se presenta principalmente en zonas donde se carece de un sistema de desagüe, las aguas residuales domésticas son vertidas en fosas sépticas o en pozos negros, las cuales se infiltran en el subsuelo contaminando las aguas subterráneas.

El uso de detergentes, tanto en la industria como en los hogares, ha crecido en forma muy importante y actualmente su empleo es general. El consumo puede situarse entre 2 y 10 Kg/año por habitante en los países con un cierto grado de desarrollo. Uno de los tipos de

sustancias tensoactivas más importantes es el constituido por los alquilbencenosulfonatos (ABS), cuya resistencia a la degradación es elevada. En algunos lugares se ha encontrado detergentes en aguas subterráneas de edad de hasta de 1 año (Mc. Kee y Wolf, 1963), lo que señala su baja degradabilidad en el terreno. Los detergentes originan espuma que es desagradable y por lo tanto afecta la potabilidad.

2) Aguas residuales industriales: Debido a que muchas industrias carecen de un lugar donde verter sus aguas residuales, o por el hecho de evitar problemas de depuración, tratan de introducir sus aguas residuales en el terreno, trayendo como consecuencia un mayor riesgo de contaminación de los acuíferos. Los tipos de contaminación son tan variados como los procesos industriales e incluyendo la contaminación térmica. Ciertos productos vertidos son fácilmente depurables mientras otros resultan de difícil de depuración.

3.3.5.- CONTAMINACION POR DERIVADOS DEL PETROLEO

La contaminación de las aguas subterráneas por derivados del petróleo es desgraciadamente frecuente y sus consecuencias pueden ser graves; puede producirse por fugas en los depósitos, vertidos accidentales, reboses en el llenado de los depósitos.

En general se trata de productos de muy baja degradabilidad, capaces de permanecer en el terreno por largo tiempo y cuya extensión es limitada si la cantidad vertida es constante, puesto que la propagación de la fase contaminante se interrumpe cuando la fracción

en el terreno desciende por debajo de un cierto valor (saturación irreductible). Dicha extensión dependerá principalmente de la viscosidad y tensión superficial del producto; de aquí que la gasolina y la nafta se extiendan con más rapidez, mientras que el gas-oil lo hace más despacio.

Si la fuga se realiza en superficie, el hidrocarburo se desplazará hacia el nivel freático, dependiendo de las propiedades antes mencionadas y, además, de la heterogeneidad del medio, al llegar ahí se acumulará flotando y desplazando el agua, con tendencia a trasladarse de acuerdo al flujo; después el agua poco a poco lo va extendiendo en el sentido del flujo hasta que la dilución sea tal que se llegue a la saturación irreductible; el movimiento horizontal es inicialmente rápido y se va frenando a medida que se extiende la mancha. La propagación es más rápida en medios altamente permeables, la disminución en este parámetro actuará como trampas que tienden a impedir la propagación.

Es importante destacar que el aceite no puede penetrar en el medio saturado y sólo desplazará el agua bajo la zona de contaminación, manteniendo las condiciones de presión. Sin embargo, existen acuíferos donde las fluctuaciones del nivel del agua (por recarga e intenso bombeo) ocasionan que la superficie libre haga subir y bajar el aceite, dejando la zona de oscilación contaminada por la saturación irreductible.

En la actualidad existen cientos de miles de tanques de acero para el almacenamiento de gasolina y muchos miles de kilómetros de tuberías enterradas que transportan petróleo a varios Estados. Además,

es frecuente el movimiento de hidrocarburos a otros continentes a través de buques-tanque. No es de extrañarse, por esto, que las fugas o derrames de hidrocarburos son fuentes que incrementan la amenaza en la calidad del agua subterránea.

Tales fugas son ocasionadas por diferentes sucesos entre los cuales se encuentran: 1) los productos contenidos en los tanques son altamente corrosivos, 2) La edad de los tanques de almacenamiento, 3) Las roturas en las tuberías de conducción y 4) Movimientos diferenciales en el terreno que ocasionan fisuras en las tuberías o tanques de almacenamiento.

Debido a que el aceite y gasolina son menos densos e inmisible en el agua migran exclusivamente en la zona no saturada. En la FIG. 3.8 se ilustra por etapas el movimiento del hidrocarburo que filtra en el subsuelo. En este caso, las condiciones hidrogeológicas son simples.

En la primera etapa de migración, el movimiento es inicialmente hacia abajo por la influencia de las fuerzas gravitacionales. Durante esta etapa de filtración, las fuerzas capilares producen un poco de migración lateral. En esta zona la formación es mojada por aceite y el grado de saturación de hidrocarburos decrece aparentemente, las fuerzas capilares son dominantes (tensión superficial).

La filtración del aceite cesa cuando el frente de la mancha alcanza el nivel del agua, aunque se puede esperar que el aceite se extienda lateralmente en el borde de la zona capilar a lo largo del nivel del agua, experimentalmente y evidencias de campo indican que la migración ocurre dentro de la franja capilar muy cerca del nivel del

agua. Puesto que el aceite es inmisible en el agua y menos denso, podrá desplazar ligeramente el nivel del agua. Excepto por una pequeña cantidad de hidrocarburos que son solubles en el agua (viajan en solución), el aceite no penetra abajo del nivel del agua, el cual se extenderá lateralmente bajo la influencia de un gradiente causado por gravedad y posteriormente por las fuerzas capilares. La extensión capilar es muy lenta, eventual y relativamente se tiene una condición estable. En teoría la estabilidad ocurre cuando se alcanza la saturación residual o irreductible.

Cuando el volumen de aceite que fuga o rebose en superficie es relativamente pequeño el movimiento de éste a través de la zona no saturada, el aceite migrará y alcanzará la saturación irreductible antes de llegar al nivel freático inmovilizandose. El volumen de poros requeridos para inmovilizar una cantidad dada de aceite dependerá de dos factores: La porosidad y la naturaleza de los hidrocarburos que componen el aceite. El volumen B de poros que es requerido para inmovilizar una fuga o derrame de aceite puede ser estimado por la siguiente relación:

$$B = \frac{B_o}{nS_o} \quad (3.9)$$

donde:

B_o es el volumen de aceite que entrará al sistema,

n es la porosidad

S_o es la saturación residual del aceite.

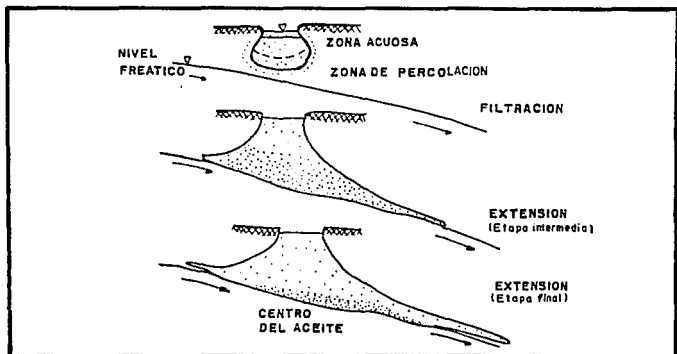


FIG. 3.8 ETAPAS DE MIGRACION DE UNA MANCHA DE ACEITE DE UNA FUENTE SUPERFICIAL, (Referencia 6).

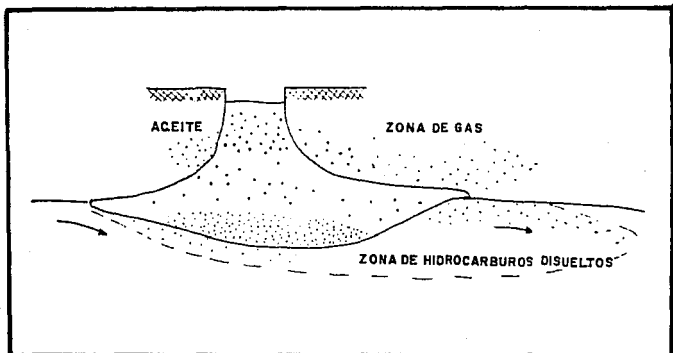


FIG. 3.9 MIGRACION DE HIDROCARBUROS DISUELTOS Y GASEOSOS DE UNA ZONA DE ACEITE BAJO EL NIVEL FREATICO, (Referencia 6).

Si la profundidad del nivel del agua y los valores de n y S_o son conocidos, la relación puede ser usada para estimar la probabilidad que la fuga de aceite penetre al nivel del agua (American Petroleum Institute, 1972).

El aceite crudo y otros derivados contienen componentes solubles en el agua. En general los derivados ligeros del petróleo son los más solubles. La gasolina comercial, por ejemplo, tiene una solubilidad de 20 - 80 mg/l; se pueden detectar por sabor y olor concentraciones de menos de 0.005 mg/l (Ineson y Packham, 1967). Puesto que la solubilidad de los componentes ligeros de los hidrocarburos es grande, los cuales exceden los niveles de concentración en el agua y se considerará seriamente contaminada.

Por ejemplo, la situación representada en la FIG. 3.9, el flujo lateral del agua subterránea debajo de la zona de aceite inmobilizado podrá causar hidrocarburos solubles y ser transportados a grandes distancias a lo largo del flujo.

En situaciones donde el aceite penetra a la zona del nivel del agua el efecto de la fluctuación de dicho nivel es muy importante. Si el nivel del agua baja, gran parte del aceite remanente crea una delgada capa en la superficie de los poros, esta película no se remueve por agua o aire, el problema puede ser mejorado por efecto de bacterias, existen especies de bacterias aeróbicas y anaeróbicas que se desarrollan rápidamente en presencia de aceite o gasolina si los otros nutrientes necesarios son también viables. En circunstancias favorables la oxidación bacteriana puede consumir mucho del aceite o gasolina que se acumula encima del nivel del agua. Las fluctuaciones

del nivel del agua subterránea creadas promueven la biodegradación.

3.3.6.- CONTAMINACION POR DESECHOS RADIACTIVOS

Uno de los mayores problemas industriales en la actualidad es el vertido seguro de los residuos radioactivos sin que representen una carga económica excesiva.

Los residuos líquidos de elevada actividad son almacenados en grandes depósitos controlados, y si es posible se les evapora a fin de tener un residuo sólido más fácil de manejar y evacuar; actualmente está en estudio la posibilidad de introducir estos residuos convencionalmente envasados en galerías profundas en rocas impermeables o su enterramiento en domos salinos.

Los residuos líquidos de actividad media siguen suponiendo una gran peligrosidad: es costoso reducir su volumen por evaporación y su almacenamiento es difícil, por los grandes volúmenes que se producen. Está en estudio avanzado la técnica de introducción y almacenamiento en terrenos impermeables, provocando previamente una fracturación hidráulica del terreno; la inyección se efectúa en forma de lechada de cemento.

3.4.- DESECHOS SUBTERRANEOS

Un método para eliminar los líquidos residuales industriales, consiste en inyectarlos al subsuelo mediante pozos, ocasionando en la mayoría de los casos, una posible contaminación de las aguas subterráneas. Este tipo de contaminación, se lleva a cabo cuando la formación geológica no presenta características hidrológicas e hidrogeoquímicas adecuadas, o por pozos de inyección que estuvieron mal proyectados, construidos o mal utilizados; Pueden originar una contaminación no sólo inorgánica, orgánica o biológica, sino también una contaminación térmica, a la que muchas veces se le concede poca importancia.

TIPOS DE LIQUIDOS RESIDUALES QUE SE INYECTAN

El primer grupo productor de aguas residuales que se inyectan mediante pozos profundos está constituido por las aguas residuales industriales. El segundo grupo lo constituyen las salmueras residuales del tratamiento de minerales potásicos. Las aguas residuales industriales pueden ser de características, concentración y origen diverso, pero en general, están asociadas a refinerías del petróleo y gas; a la industria química, farmacéutica y de tratamiento metalúrgico.

Entre los residuos líquidos de plantas químicas se encuentran las salmueras sódicas, cálcicas y magnésicas, los fenoles, clorofenoles y

bifenoles, las soluciones caústicas, los ácidos orgánicos e inorgánicos y en especial el acético, los licores de papeleras; en especial las plantas de tratamiento de combustible irradiado, dan origen a aguas residuales radioactivas con características propias que deben recibir consideraciones especiales por su peligrosidad y elevada generación de calor. La inyección se efectúa en forma de lechada de cemento.

La minería extractiva del uranio también genera aguas residuales que en ocasiones se inyectan, unas veces como residuos radioactivos y en otras como un simple residuo ácido de minería extractiva.

3.5.- MECANISMOS DE CONTAMINACION

Los fenómenos que controlan el desplazamiento de un contaminante a través de una matriz porosa pueden ser transcritos en términos que permitan establecer ecuaciones que describan la migración de un soluto en el flujo subterráneo .

El establecimiento de un marco teórico adecuado requiere antes de la proposición de un modelo general hidrodinámico que conceptualice el flujo del contaminante hacia el acuífero.

Un esquema general puede ser representado por una fuente puntual en la superficie del terreno con flujo del contaminante en la zona no saturada, el cual se continúa en la franja capilar para llegar a la zona saturada, en donde se inicia la mezcla y la migración en el flujo subterráneo dando lugar a una nube o pluma contaminante.

DESARROLLO HIDROLOGICO DE LA CONTAMINACION

Los mecanismos de contaminación presentan variantes en el subsuelo, conforme a la zona en que se presenta dicho fenómeno.

1) Transporte en la zona no saturada:

En esta zona el contaminante migra como resultado de los procesos de difusión y de dispersión. El flujo del soluto es controlado por la carga del contaminante, misma que es originada por la presión y la fuerza de gravedad donde se relaciona con la succión, la presión capilar y un potencial asociado a la matriz porosa. De éstas componentes, la succión es la presión negativa que tiende a extraer el agua de la matriz porosa.

2) Transporte en la zona saturada:

El transporte de un soluto en un medio saturado puede ser transcrito matemáticamente considerando que las relaciones entre la pluma contaminante y el medio son mínimas, esto es, se desprecian fenómenos de absorción, precipitación, reducción e intercambio iónico. Si se le considera como primer y más simple mecanismo, el transporte del soluto es producto sólo de la velocidad del flujo, esto es, por absorción, el desplazamiento tendrá lugar a la velocidad lineal promedio del flujo.

3.6.- DIFUSION Y DISPERSION HIDRODINAMICA

El conocimiento de los fenómenos de difusión y dispersión son básicos en los estudios relacionados con la recarga artificial, contaminación, intrusión marina, inyección de líquidos residuales o desplazamiento de agua de diferente composición, para determinar sus efectos, y de qué manera pueden verse afectadas otras aguas o captaciones existentes y el grado de mezcla que se produce.

Si en un medio poroso coexisten dos fluidos miscibles, tiende a producirse una mezcla en la zona de contacto debida a los fenómenos de difusión y dispersión.

En un sistema en reposo conteniendo agua en el que se ha introducido un fluido claramente diferenciable, la mancha producida va aumentando progresivamente, al mismo tiempo que se va diluyendo; es un proceso producido por la agitación molecular de los líquidos a consecuencia de su temperatura y se llama difusión molecular o simplemente difusión. Si existe una diferencia de densidad entre ambas aguas se puede establecer un incremento de mezcla al establecerse un movimiento convectivo, o sea por desplazamiento de masas.

El proceso por el cual dos líquidos miscibles se mezclan alrededor de la interfase cerca de sus fronteras, cuando el flujo hidráulico causa que el límite se mueva, es conocido como dispersión. En el flujo laminar a través de un medio poroso permeable, la dispersión resulta de los efectos combinados de convección (transferencia de un fluido dentro de una región de otro debido a las variaciones de velocidades dentro de los intersticios) y la difusión

molecular.

Cuando las partículas del fluido se mueven en un plano normal a la dirección de flujo, se origina una dispersión hidrodinámica longitudinal o frontal. Al mismo tiempo los diferentes trayectos tienen direcciones oblicuas a la dirección media del flujo y se distribuyen dentro de un cono (FIG. 3.10), originando una dispersión transversal o lateral. Este cono puede quedar limitado cuando se alcanzan los bordes del medio poroso, en cuyo caso la dispersión lateral se amortigua y cesa cuando llega a la homogeneización del fluido.

Para velocidades de flujo relativamente elevadas domina la dispersión hidrodinámica y para movimientos muy lentos domina la difusión molecular.

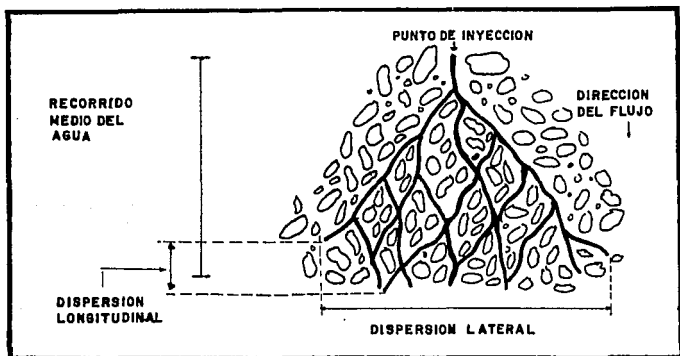


FIG: 3.10 DISPERSION HIDRODINAMICA, (Referencia 3).

En medios heterogéneos existen unos niveles más permeables que otros, de modo que el avance del frente entre los dos fluidos es más rápido en unos lugares que en otros dando lugar a digitaciones (FIG. 3.11). Estas digitaciones pueden originar una dispersión frontal (longitudinal) muy acusada (FIG. 3.11). A este tipo de dispersión se le llama dispersión por digitaciones o dispersión (hidrodinámica) macroscópica, en contraposición a la dispersión creada por los poros que se la llama también dispersión (hidrodinámica) microscópica.

Entre ambas formas de dispersión existe una importante diferencia conceptual. Si se invierte la dirección del flujo, la dispersión microscópica continua, pues siguen produciéndose las mismas acciones descritas; la dispersión hidrodinámica macroscópica puede deshacerse en parte, ya que el retroceso se hace también de acuerdo con las diferencias de permeabilidad; sólo persiste y se incrementa la dispersión debida a la difusión y dispersión hidrodinámica microscópica, las cuales coexisten superpuestas con la dispersión hidrodinámica macroscópica.

La correcta formulación de los fenómenos de difusión y dispersión es compleja, ya que es muy difícil simular física y matemáticamente los fenómenos que tienen lugar en el medio poroso, aun en casos sencillos. Con ciertas restricciones es posible encontrar fórmulas cuya validez ha sido sancionada por la práctica, y son tales que contienen unos coeficientes -coeficientes de difusión y de dispersión-, que engloban muchas propiedades del flujo y del medio, que en general deben determinarse experimentalmente.

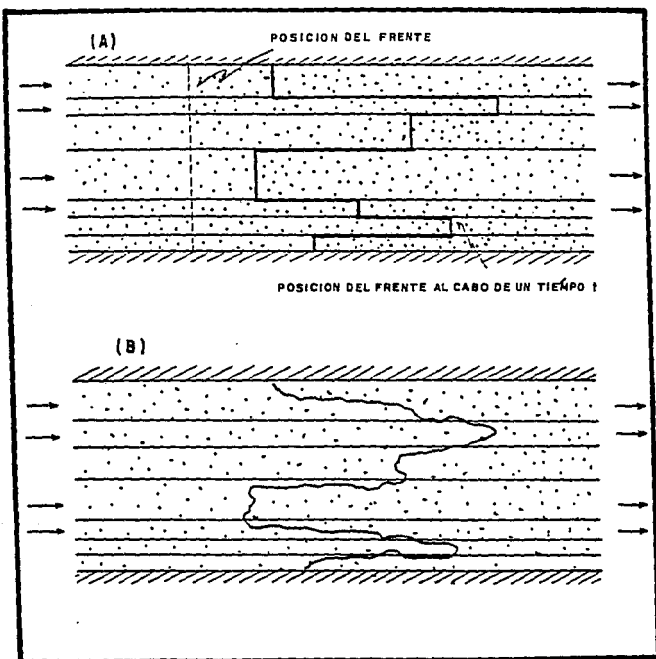


FIG. 3. II DISPERSION HIDRODINAMICA POR DIGITACION (MACROSCOPICA)

- A) Situación del frente de desplazamiento en ausencia de difusión y dispersión microscópica en un medio de estratos uniformes,
- B) Situación real de las digitaciones. Los niveles menos permeables tienden a ser invadidos a partir de los más permeables por dispersión lateral y difusión.
(Referencia 3).

El problema puede plantearse desde un punto de vista estadístico, con desarrollos complicados, o más elementalmente admitiendo que en un medio poroso homogéneo e isotrópico con dos líquidos de propiedades similares en régimen laminar, se cumple la ley de Fick, tanto para la difusión como para la dispersión. La ley de Fick establece que el transporte de masas es proporcional al gradiente de concentración de un líquido en el otro.

Así pues, en un fenómeno de difusión molecular la velocidad de transporte de masa j_x ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{seg}$), en la dirección x , vale:

$$j_x = - D_m \frac{\partial c}{\partial x} \quad (3.10)$$

en la que c representa la concentración (g/cm) y D_m (cm^2/seg) el coeficiente de difusión molecular o difusividad molecular.

Para la dispersión se supone que también se cumple la ley de Fick con un coeficiente de dispersión o de dispersividad D ($\text{m}^2/\text{día}$).

$$j_x = - D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (3.11)$$

En la realidad puede suponerse que D_m es casi independiente de la dirección pero no sucede lo mismo con D , para la que el valor en dirección transversal es varias veces menor (de 5 a 10) que la dirección longitudinal.

3.7.- VULNERABILIDAD DE LOS ACUIFEROS A LA CONTAMINACION

Para evaluar el riesgo de contaminación en acuíferos es necesario considerar vulnerabilidad natural de contaminación del mismo, y la carga contaminante causada sobre el medio hidrogeológico; ambos criterios están determinados por ciertos factores, de los cuales cada uno, a su vez, comprende un número de elementos interrelacionados. En el caso de la vulnerabilidad, considerada como respuesta del medio acuífero al agente externo, puede ser expresada más convenientemente en términos de:

a) Periodo relativo de atraso para el acceso de contaminantes; el cual constituye uno de los aspectos más importantes, pues es aquí donde la zona no saturada ejerce su influencia, y es función de los siguientes aspectos (FIG. 3.12):

Condición natural del acuífero. la cual puede presentar diferentes grados de confinamiento hasta llegar al tipo libre, es claro que entre mayor sea el nivel de confinamiento, más difícil será para el agente contaminante entrar en contacto con las aguas del subsuelo.

Profundidad del nivel estático. aunque en muchos casos se presentan fuertes variaciones de éste, por lo que se sugiere considerar la profundidad del nivel superior de las aguas subterráneas en épocas de nivel más alto de las mismas; entre más profundo se encuentren los niveles, mayor es el espesor de la zona no saturada y su capacidad de atenuación.

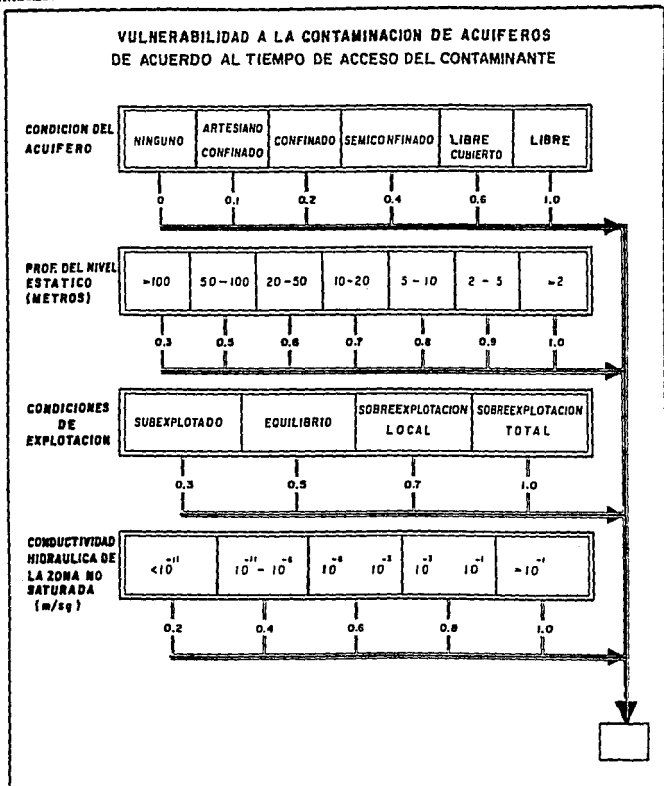


TABLA 3.12 (Referencia 17).

Condiciones de explotación, la forma en que se realiza el aprovechamiento puede ocasionar la sobreexplotación del acuífero originando con esto diferencias de presión hidrostática, ocasionando fuertes gradientes hidráulicos con lo que culmina la interconexión de acuíferos y probablemente migración del agua contaminada de otros cuerpos de agua, entre los que se se cuenta la intrusión de agua marina y la infiltración de aguas superficiales contaminadas.

Conductividad hidráulica de la zona no saturada, entre menor sea ésta, más difícil será para el agente contaminante desplazarse hacia la zona saturada, constituyendo de esta manera un factor retardante en el proceso de contaminación.

b) Capacidad para reacción fisicoquímica y retención, con respecto a contaminantes menos móviles, este aspecto se refiere a la respuesta del medio hidrogeológico una vez que el agente contaminante ha ingresado al mismo y es función de los siguientes puntos (FIG. 3.13):

Estratificación del medio acuífero, es claro que entre más estratificado sea éste, más limitada estará la propagación del agente contaminante a toda la zona saturada, estableciéndose direcciones preferentes de propagación en función de la permeabilidad de los estratos del acuíferos y del mismo flujo subterráneo.

Litología global del acuífero, en este aspecto quedan implícitos los fenómenos de difusión y dispersión de los agentes contaminantes en función de la granulometría, textura, fracturamiento; así mismo los procesos químicos que pudieran dar a partir de la estructura química de la matriz del acuífero.

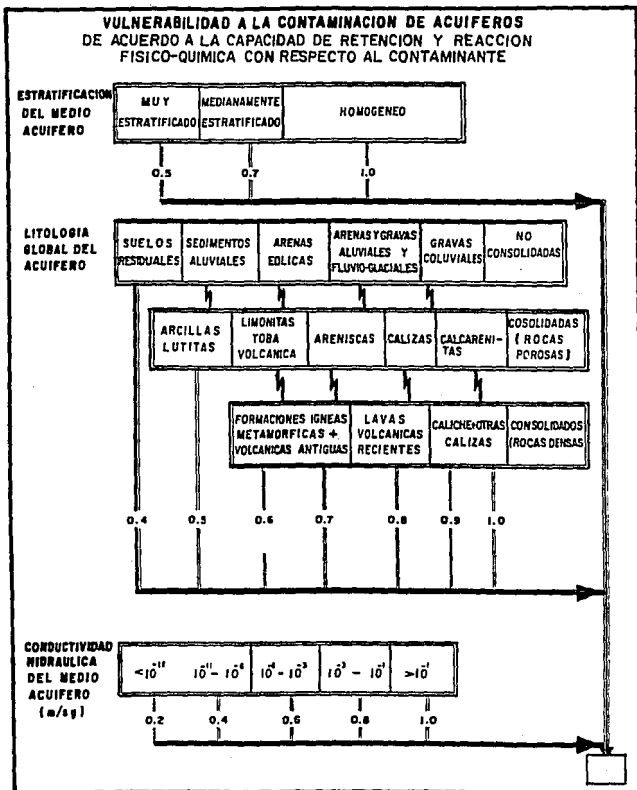


TABLA 3.13 (Referencia 17).

Conductividad hidráulica del medio acuífero. - Esta define patrones de dispersión y de difusión de los contaminantes pero también puede influir en el tiempo de contacto, permitiendo el desarrollo de procesos químicos entre agua contaminada y la matriz del acuífero.

c) Potencial general de dilución del medio hidrogeológico; en la evaluación de la vulnerabilidad es importante considerar el efecto de los agentes externos al medio hidrogeológico en sí y que de alguna manera influyen en el amortiguamiento del efecto contaminante siendo los siguientes los aspectos principales (FIG. 3.14).

Precipitación pluvial, en zonas donde la precipitación es baja, la acción solvente del agua provoca que grandes cantidades de sales sean transportadas hasta la zona saturada, contaminando de esta manera las aguas del subsuelo hasta limitar la utilización, así también una precipitación alta puede aminorar el impacto del agente contaminante, ya sea diluyéndolo o transportándolo en forma de flujo subsuperficial.

Origen de la recarga, entre más directa sea la recarga, más fácil es la renovación del agua subterránea y mayores posibilidades tiene para diluir el agente contaminante de manera que una recarga proveniente de zonas muy alejadas tardará mucho en manifestarse en la zona contaminada y en caso extremo de que ésta sea nula, pocas posibilidades quedan para disminuir, por dilución o por renovación, el impacto del agente contaminante.

dimensión más corta del acuífero, la cual sucede generalmente en la dirección normal al flujo subterráneo y que nos permite formarnos una idea del potencial de dilución del medio del acuífero, en el caso de ser este de dimensiones muy pequeñas con una sola descarga puntual

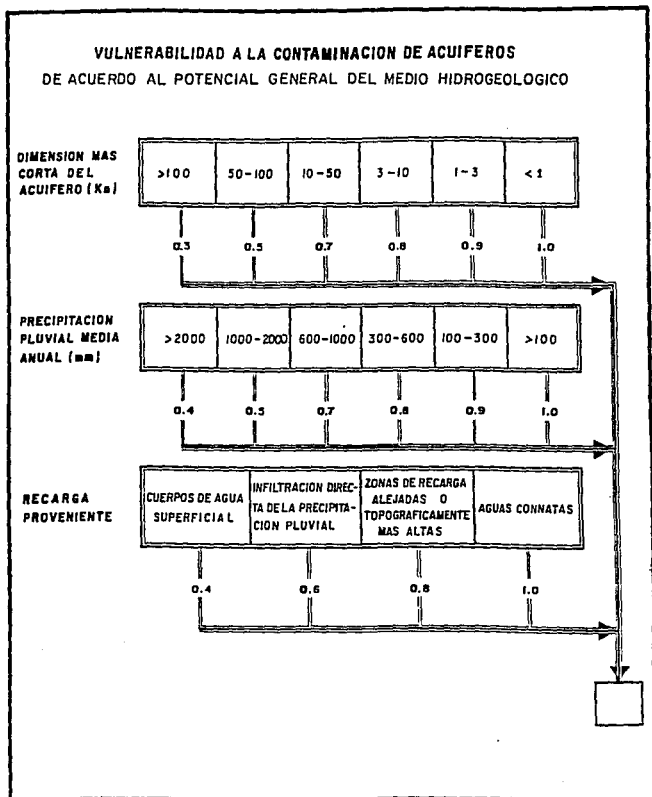


TABLA 3.14 _ (Referencia 17).

sería suficiente para dañar toda la zona de explotación no así en el caso de acuíferos de grandes dimensiones.

Considerando todos los aspectos mencionados anteriormente se considera conveniente proponer una metodología que permita evaluar, en forma general, qué tan vulnerable sería un acuífero a la contaminación, sin que esto se torne un proceso engorroso y no cuantificable, considerando que la determinación debe ser diseñada para que pueda llevarse a cabo en forma relativamente rápida con recursos humanos limitados, y en muchos casos utilizando datos básicos recolectados para otros propósitos.

Considerando un mismo acuífero pueden existir diferentes niveles de vulnerabilidad y que su distribución espacial sería la pauta para elegir sitios para el emplazamiento de actividades potencialmente contaminantes; se recomienda aplicar el siguiente procedimiento cartográfico: Inicialmente se efectúa un análisis de toda la información existente y que pueda ser aplicada; recopilando planos de la zona de estudio con información topográfica, geológica, explotación del agua subterránea, niveles estáticos, así mismo, se recopila información sobre las características hidráulicas del acuífero.

Para la distribución espacial de la información se traza una malla que cubra toda la zona a analizar y en el cual el tamaño de la celda dependerá de la complejidad del medio hidrogeológico, dándose coordenadas a cada uno donde se desea evaluar la vulnerabilidad; para ello se dan valores de peso a cada uno de los aspectos antes mencionados y se evalúan por separado los elementos que afectan dicha vulnerabilidad en cada nodo; paralelo a esto se propone una escala de

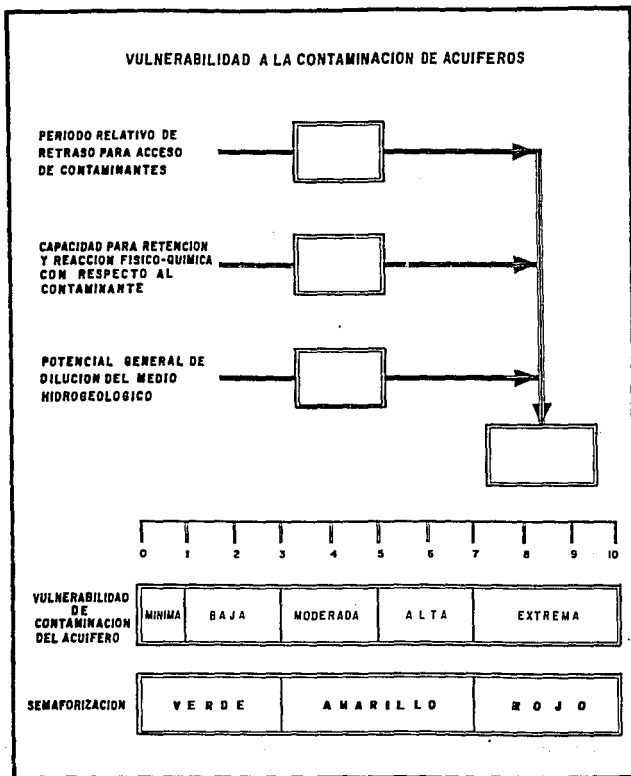


TABLA 3.15 (Referencia 17).

valores que permita tipificar los resultados (FIG. 3.15); es así, que para el periodo de retraso del acceso del contaminante se tiene cuatro aspectos a considerar con un valor máximo de cuatro para el inciso, en la capacidad de retención y de reacción fisicoquímica se tienen tres puntos con igual valor y, similarmente para el potencial de dilución del medio hidrogeológico, acumulándose un total de diez puntos como máximo en cada nodo; al terminar de analizar todos los nodos se efectúa la configuración de isovalores de vulnerabilidad.

Se proponen dos escalas para tipificar la vulnerabilidad del acuífero, la primera los clasifica en mínima, baja, moderada, alta y extrema vulnerabilidad, por otro lado se propone una escala de colores que permita llegar a una "semaforización" del acuífero con miras a un posterior ordenamiento del territorio, el cual sirva de guía para considerar, revisar o autorizar el emplazamiento de actividades potencialmente contaminantes sean éstas industriales, agrícolas, públicas, urbanas u otras.

3.8.- CALIDAD DEL AGUA

La calidad a través de los contenidos de elementos y sustancias en el agua, se puede conocer si se llevan a cabo exámenes minuciosos que den resultados cualitativos y cuantitativos de cada uno de ellos. De aquí que la evaluación de la contaminación sólo se concibe si se especifica el uso o destino del agua y se llevan a cabo los análisis para conocer sus contenidos. Entre los diferentes análisis existentes

para determinar los parámetros que definen el grado de contaminación se encuentran los físicos, químicos y biológicos (Tabla 3.1).

Es importante que al analizar las aguas contaminadas se determinen los constituyentes que puedan dificultar su tratamiento así como los que faciliten la elección del proceso más conveniente. Se deben hacer análisis de muestras del líquido en estudio, para comprobar el grado de contaminación y posteriormente análisis para ver el progreso, ya sea de contaminación o de depuración.

Una lista de constituyentes del agua, junto con una indicación acerca de sus fluctuaciones naturales se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1.- Tipos de análisis efectuados a muestras de aguas.
(referencia 16)

a) Físicos

Temperatura	Residuos en todas sus formas
Color	pH
Olor	Conductividad eléctrica
Turbidez	Radiactividad

b) Químicos

1) Gases disueltos

Amoniaco	Nitrógeno
Bióxido de Carbono	Oxígeno
Sulfuro de Hidrógeno	Bióxido de Azufre

2) Cationes (e⁺)

Aluminio	Hierro
Amonio	Sodio y Potasio
Bario y Estroncio	Plomo
Calcio y Magnesio	Manganeso
Cromo	Niquel
Cobre	Zinc
Ion Hidrógeno	

3) Aniones (e⁻)

Bromo y Yodo	Nitrato
Carbonato y Bicarbonato	Nitrito
Cloruro	Fosfato
Cromato y Dicromato	Sulfato
Cianuro	Sulfuro
Fluoruro	Sulfito
Hidróxido	

4) Varios

Acidez y Alcalinidad	Grasas y Aceites
Demanda Química de Oxígeno	Fenol
Dureza	Silice
Nitrógeno Kjeldahl	Detergentes
Nitrogeno Orgánico	

Tabla 3.1.- Continuación

c) Biológicos

Demanda Bioquímica de Oxígeno
 Demanda Inmediata de Oxígeno Disuelto
 Bacteriología

Tabla 3.2.- Sólidos Disueltos en las Aguas Subterráneas.
(referencia 4)

Constituyentes principales (de 1.0 a 1000 ppm)

Sodio	Bicarbonato
Calcio	Sulfato
Magnesio	Cloruro
Silice	

Constituyentes secundarios (de 0.01 a 10.0 ppm)

Antimonio	Plomo
Aluminio	Litio
Arsénico	Manganeso
Bario	Molibdeno
Bromo	Níquel
Cadmio	Fosfato
Cromo	Rubidio
Cobalto	Selenio
Cobre	Titanio
Germanio	Uranio
Yodo	Vanadio
Zinc	

Constituyentes traza (generalmente en cantidades inferiores a 0.001 ppm)

Berilio	Reutenio
Bismuto	Escandio
Cerio	Plata
Cesio	Talio
Galio	Torio
Oro	Estaño
Indio	Tungsteno
Lantano	Yterbio
Niobio	Ytrio
Platino	Zirconio
Radio	

Los resultados de los análisis químicos practicados a las muestras de agua, son reportados en las siguientes unidades:

p.p.m. partes por millón. - Una parte por millón de partes equivale a una parte en peso de materia disuelta en un millón de partes en peso de agua; esta unidad es independiente del sistema de medidas empleado.

mg/l miligramos por litro. - Esta unidad relaciona peso con volumen y es generalmente utilizada en el laboratorio, ya que las muestras de agua se miden en fracción de litro y los componentes químicos en miligramos. Ambas unidades son formas de expresión equivalentes numericamente iguales si la concentración de sólidos disueltos es baja y el peso específico del agua es uno.

Peso equivalente: Los aniones y los cationes se combinan y se disocian entre ellos según una unidad de peso determinado. Esta unidad es el peso equivalente, el cual es igual al cociente de la masa atómica del elemento considerado entre su valencia.

$$\text{Peso equivalente} = \frac{\text{masa atómica}}{\text{valencia}}$$

meq/l miliequivalente por litro. - La unidad de concentración es el equivalente por litro, el cual se define como el número de equivalentes contenidos en el peso del elemento, expresado en gramos, disuelto en un litro de agua.

$$\text{meq/l} = \frac{\text{miligramos por litro}}{\text{peso equivalente}}$$

epm equivalente por millón obteniéndose al dividir la concentración de un ion en ppm, por su peso equivalente.

$$\text{epm} = \frac{\text{concentración del ion considerado}}{\text{peso equivalente}}$$

3.8.1.- SÓLIDOS DISUELTOS

El total de sólidos disueltos en una muestra de agua se refiere a todo el material sólido en solución, esté ionizado o no. No incluye, sin embargo, este concepto, a los sedimentos en suspensión, a los coloides, ni a los gases disueltos, sería la suma numérica de todos los constituyentes determinados.

3.8.2.- GASES CONTENIDOS EN LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Muy rara vez, en los análisis normales, se lleva a cabo el estudio de los gases que se encuentran disueltos en las aguas subterráneas; sin embargo, los gases tienen una enorme importancia en hidrogeología. Los gases que se desprenden de las soluciones acuosas forman burbujas que tienen a entorpecer la circulación de las aguas en los acuíferos, particularmente en las proximidades de los pozos. Ciertos gases disueltos, tales como oxígeno y el dióxido de carbono, son capaces de alterar considerablemente la composición química de las

aguas; otros gases afectan sobre todo su calidad química. El metano que se desprende de las soluciones puede acumularse, constituyendo un peligro potencial por su posibilidad de inflamación y explosión; el oxígeno disuelto produce la corrosión de los metales y el sulfuro de hidrógeno, en concentraciones superiores a 1 ppm, inutiliza el agua para el consumo humano y animal a causa de su olor tan repugnante. El sulfuro de hidrógeno favorece el desarrollo de ciertas bacterias que obstruyen las tuberías y las rejillas de los pozos.

3.8.3.- MATERIA EN SUSPENSION

3.8.3.1.- MATERIA INORGANICA

En el agua de los pozos pueden encontrarse diferentes tipos de materia inorgánica en suspensión. Las pequeñas partículas de óxido férrico que a veces pueden contener las aguas suelen proceder de la oxidación de las tuberías metálicas de las conducciones y tuberías de impulsión de las bombas o, incluso, de la oxidación y precipitación del hierro son suspensiones de limos y arenas finas, particularmente en los pozos sometidos a una fuerte extracción. En algunos pozos que obtienen su agua de acuíferos calcáreos, pueden existir también suspensiones apreciables de arcilla. La turbidez se presenta a menudo como consecuencia de una fuerte lluvia cuando la circulación rápida del agua arrastra la arcilla de las fisuras y cavernas hasta el interior de los pozos de bombeo; en otros casos, la turbidez suele ser

el resultado de una perturbación exterior, ajena al acuífero, que se produce desde la superficie directamente al interior de los pozos.

La extracción de cantidades excesivas de arenas finas, limos y arcillas de las formaciones acuíferas puede provocar importantes hundimientos y asentamientos en los terrenos colindantes a los pozos, con el consiguiente daño para los mismos y para áreas afectadas.

3.8.3.2.- MATERIA ORGANICA

La materia orgánica presente en las aguas de los pozos es fundamentalmente de tres tipos: 1) Los organismos vivos, en su mayoría de tamaño microscópico. 2) Los restos de organismos muertos que se encuentran en suspensión en las aguas. 3) Los compuestos orgánicos en solución.

Los organismos vivos son, en mucho, los más importantes, ya que algunos de ellos pueden ser patógenos y muchos de los que no lo suelen ser indicadores indirectos de contaminaciones. Las enfermedades más conocidas entre las difundidas por medio de las aguas subterráneas son el tífus, el cólera, la disentería amebiana y las hepatitis infecciosas. Otras enfermedades que tienen su origen en la ingestión de aguas subterráneas son la poliomiелitis, la gastroenteritis, la anquilomiasis y las esquitomiasis.

La mayor parte de los organismos muertos presentes en las aguas subterráneas provienen de la contaminación directa de los pozos y manantiales, o del aumento del gel bacterial que pulula en los pozos

que tienen aguas con unas pocas partes por millón de manganeso y hierro disueltas.

Respecto a los compuestos orgánicos solubles, aunque presentes en cantidades traza en la mayoría de las aguas subterráneas. Los azúcares, el ácido tánico, los almidones, los aceites, el metano y otra serie de constituyentes, se presentan probablemente en cantidades comprendidas, para la mayoría de las aguas poco profundas, entre 0.1 y 10 ppm. Los constituyentes orgánicos muy raramente llegan a alcanzar concentraciones tan elevadas como para producir olores y sabores desagradables y coloraciones especiales.

3.8.4.- CLASIFICACION DE LAS AGUAS

El objetivo principal de clasificar las aguas subterráneas, es el de proporcionar información acerca de su composición química, propiedades determinadas o el origen de las mismas; existen numerosas clasificaciones sencillas y complicadas, contándose entre las primeras las relacionadas con el uso del agua (doméstico, agrícola, ganadero, industrial o municipal), tales como las relacionadas con su contenido en sólidos totales disueltos, dureza, propiedades destacadas, conductividad eléctrica y relación de adsorción de sodio (RAS). Entre las segundas que proporcionan información geoquímica se encuentran las que clasifican al agua por los iones dominantes, por su contenido aniónico, por su salinidad y alcalinidad.

En general las clasificaciones que aportan mayor información son

las más complicadas. A continuación se describen algunas clasificaciones de las más utilizadas.

3.8.4.1.- CLASIFICACION POR EL CONTENIDO DE SOLIDOS TOTALES DISUELTOS (STD)

CLASIFICACION	Concentración de STD en ppm
Agua dulce	0 - 1,000
Agua salobre	1,000 - 10,000
Agua salada	10,000 - 100,000
Salmuera	más de 100,000

3.8.4.2.- CLASIFICACION POR IONES DOMINANTES

Consiste en denominar el agua por el anión y el catión que sobrepase el 50% de sus sumas respectivas (por ejemplo cálcico-bicarbonatada), si ninguno de los cationes y/o aniones supera el 50% se nombran los datos más abundantes (por ejemplo clorurada-bicarbonatada-cálcica); en algunos casos se puede añadir el nombre de algún ion menor que se encuentre en concentración elevada. En la FIG. 3.16 se presenta un diagrama triangular que muestra los nombres que reciben los distintos tipos de aguas subterráneas, dependiendo del área en que se ubiquen al ser representados en él.

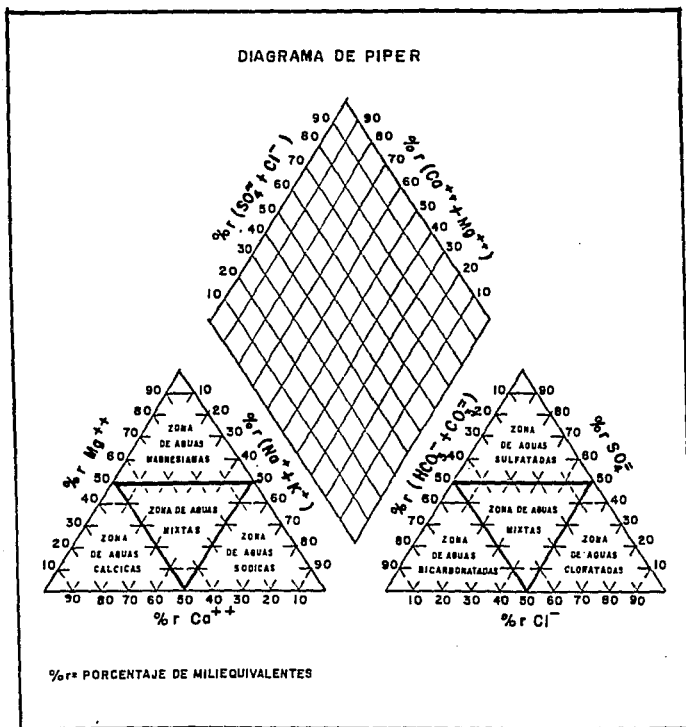


FIG. 3.16 DIAGRAMA TRIANGULAR QUE INDICA LOS DIFERENTES TIPOS O FAMILIAS DE AGUAS DE ACUERDO AL CATION Y ANION PREDOMINANTE, (Referencia 6).

4.- SOBREPLOTACION Y HUNDIMIENTO

4.1.- ELEMENTOS DEL BALANCE VOLUMETRICO

El balance general de un acuífero o porción del mismo puede expresarse por el principio de conservación de la materia en su forma más simple que es llamada "ecuación de balance de aguas subterráneas" y es la siguiente:

Entradas - Salidas = Variación de Almacenamiento

$$E - S = \pm \Delta V \quad (4.1)$$

Los diferentes términos de la ecuación, expresados en las mismas unidades, pueden escribirse como:

Infiltración en el terreno procedente de la precipitación. . . (IP)
 Infiltración procedente de aguas superficiales (ríos y lagos). (IR)
 Entrada subterránea por los límites. (Q_l)
 Entrada subterránea de otros acuíferos. (Q_e)
 Recarga artificial. (RA)
 Salida (descarga) de agua subterránea a los cauces de los ríos. (DR)
 Evapotranspiración de agua del terreno. (ET)

Salida de agua subterránea por los límites. (Q_{ls})

Salida de agua subterránea a otros acuíferos. (Q_e)

Salida de agua subterránea en manantiales. (Q_m)

Extracción de agua subterránea (bombeo). (B)

entonces queda:

$$IP + IR + Q_{le} + Q_e + RA - DR - ET - Q_{ls} - Q_e - Q_m - B = \pm \Delta V \quad (4.2)$$

También se puede escribir de la siguiente manera:

(entradas subterráneas - salidas subterráneas) + (infiltración de lluvia en el terreno - evapotranspiración) + (entradas superficiales - salidas superficiales) + (recarga artificial - bombeo) = variación en el almacenamiento

o sea:

$$(Q_{le} + Q_e - Q_{ls} - Q_e) + (IP - ET) + (IR - DR - Q_m) + (RA - B) = \pm \Delta V \quad \dots (4.3)$$

Dependiendo de como se presente la recarga y descarga de un acuífero en estudio durante un intervalo de tiempo dado, los términos de la ecuación (4.3) pueden o no aparecer. En el caso de acuíferos limitados totalmente por fronteras impermeables Q_{le} , Q_e , Q_{ls} y Q_e no aparecerán, ya que no existe entrada ni salida por flujo subterráneo; si no existen niveles freáticos someros ET puede eliminarse, lo mismo

que Q_m en caso de que no existan afloramientos; también si no existen ríos o lagos en la zona de estudio los términos IR y DR desaparecen. La ecuación de balance para un determinado acuífero, puede variar de un intervalo de tiempo a otro, según las condiciones climáticas que prevalezcan en la zona de estudio, pudiendo así aparecer el término IP en un período lluvioso o eliminándolo si la ecuación se plantea para un período de estiaje.

Los términos Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4 se pueden calcular si se conocen las transmisividades, los gradientes piezométricos y la longitud del contorno afectado, mediante las configuraciones piezométricas.

Para obtener las configuraciones piezométricas, es necesario referir los niveles estáticos a un plano horizontal que por lo general es el nivel del mar.

Las curvas obtenidas por interpolación de los valores conocidos, representan la forma de la superficie piezométrica en un acuífero confinado o semiconfinado y la forma de la superficie freática en un acuífero libre.

Cuando ya se cuenta con configuraciones de curvas de igual elevación al nivel estático es posible determinar la red de flujo, en la cual se presenta la dirección que sigue el agua subterránea, las zonas de recarga y descarga, los gradientes hidráulicos, y los efectos de la explotación.

Con la red de flujo trazada, considerando la ley de Darcy, puede hacerse una cuantificación de los caudales de flujo subterráneo, normales a las curvas de igual elevación al nivel estático o equipotenciales y las líneas de corriente (FIG. 4.1).

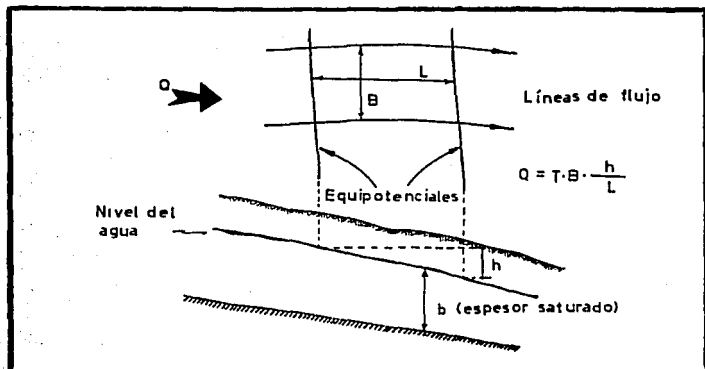


FIG. 4.1 (Referencia 18).

Una *red de flujo* es un gráfico bidimensional compuesto por dos familias de curvas de indole especial que sean representativas: las *líneas de flujo* o *líneas de corriente*, indican la trayectoria del movimiento en el medio poroso y el análisis de problemas tridimensionales que presenten simetría axial o radial.

La ley de Darcy establece que la velocidad de flujo a través de un medio poroso, es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud de la trayectoria de flujo. Matemáticamente esta ley se expresa de la siguiente manera:

$$v = K \frac{h}{L} = K i \quad (4.4)$$

donde

v = velocidad media de flujo

h = pérdida de carga

L = distancia

i = gradiente hidráulico

K = coeficiente de permeabilidad

Con estos elementos se puede entonces cuantificar el caudal de flujo que circula a través de una sección limitada por dos líneas equipotenciales y dos líneas de corriente. Considerando la ley de continuidad y la ley de Darcy se tiene:

$$Q = Av = Ak \frac{h}{L} \quad (4.5)$$

donde A es el área de flujo. Utilizando el concepto de transmisividad, expresado como el coeficiente de permeabilidad multiplicado por el espesor del acuífero ($T = Kb$), se obtiene:

$$Q = Tb \frac{h}{L} = Tbi \quad (4.6)$$

donde T es la transmisividad y b es el ancho medio de flujo.

Los volúmenes de entrada y salida se calculan multiplicando los caudales de flujo que pasan por el perímetro del área de balance por el intervalo de tiempo utilizado para plantear el balance. La expresión matemática a utilizar sería:

$$Q_{te}, Q_e, Q_{ts}, Q_s = \sum_{j=1}^{nc} Q_j t = \sum_{j=1}^{nc} T_j b_j i_j t \quad (4.7)$$

donde T_j , b_j e t_j son la transmisividad, el ancho de flujo y el gradiente hidráulico, del canal de flujo j , respectivamente; t es el tiempo considerado para plantear el balance, y n_c es el número de canales de flujo de entrada y/o de salida, definidos en la periferia del Área de balance. Los valores de b y L se miden directamente en la red de flujo.

Los términos IR , DR y Q_m se deducen a partir de aforos en ríos y manantiales; no obstante, la parte correspondiente a la recarga en los cauces no siempre es de fácil evaluación, puesto que los valores a medir son a veces menores que el margen de error de los aforos, o de los términos del balance de aguas superficiales:

entrada superficial - salida superficial + escurrimiento superficial en el terreno + $Q_m - IR + DR =$ variación en el almacenamiento de agua en el río.

El término B (extracción del agua subterránea) se evalúa mediante hidrometría de los aprovechamientos del agua subterránea. Este concepto se refiere a los diferentes métodos que se siguen para cuantificar los volúmenes de descarga, de las aguas subterráneas. De hecho, el volumen de descarga de agua subterránea más significativo, lo constituyen las extracciones mediante pozos de bombeo, dependiendo éstas de la extensión de la zona explotada y el uso a que se destine el agua. La determinación de dicho volumen se hace con base en un censo de pozos, seleccionándose de él, los aprovechamientos que por las características de su equipo de bombeo y/o su régimen de operación, tenga una influencia significativa en el volumen total. Según el uso o usos a que se destinen los pozos seleccionados, se

eligirá la forma más conveniente de estimar sus volúmenes de extracción. Entre los métodos que pueden utilizarse se tienen:

- 1.- Medidor totalizador de flujo.
- 2.- Consumo de energía eléctrica y caudal
- 3.- Reloj horario de trabajo del motor y caudal.
- 4.- Tarjetas anotando arranque y paro por parte del bombeo y caudal.
- 5.- Superficie y lámina de riego
- 6.- Agrupando los pozos por diámetro de descarga y uso e investigando el volumen de extracción de los pozos seleccionados en cada grupo.

El término de la evapotranspiración solo tiene significado dentro de la ecuación, si en el área de estudio existen zonas con nivel freático somero, calculándose mediante la aplicación del valor de la evaporación potencial media.

El cambio de almacenamiento, se calcula a partir de la evolución piezométrica y del coeficiente de almacenamiento del acuífero. La expresión matemática que se utiliza es la siguiente:

$$\Delta V = \pm S \sum_{j=1}^{n_a} a_j h_j \quad (4.8)$$

en donde S, es el coeficiente de almacenamiento, a_j es un elemento de área con evolución piezométrica h_j y n_a es el número de elementos en que se divide el área de balance.

Mediante curvas de igual evolución del nivel estático

correspondiente al intervalo de tiempo seleccionado para plantear el balance, se calcula, en el caso de un acuífero confinado, la variación total de la presión. En algunos casos el coeficiente de almacenamiento se determina mediante pruebas de bombeo, o bien se infiere de acuerdo a los materiales que constituyen al acuífero; cuando no existe tal información o su valor regional es muy dudoso, se deja en la ecuación de balance como incógnita a despejar.

4.2.- SOBREEXPLOTACION ACUIFERA

El agua subterránea en México, constituye uno de los recursos hidráulicos más importantes, principalmente para sus regiones áridas y semiáridas, que cubren más del 60% del área del país, motivo por el cual su aprovechamiento en dichas zonas se ha llevado a cabo en forma intensiva.

Hace cuatro décadas, aproximadamente, la extracción del agua subterránea se efectuaba de manera racional, es decir, el volumen de agua extraída de los acuíferos no rebasaba la recarga natural de ellos, manteniendo un equilibrio en el balance de agua. Conforme la agricultura iba floreciendo, la industria tendía al desarrollo, y además, el país sufría un crecimiento demográfico en forma explosiva, se iba requiriendo cada día más cantidad de agua; motivo por el cual los acuíferos comenzaban a sufrir una explotación intensiva.

Con el advenimiento de la sobreexplotación, se presentaron ciertos problemas en los acuíferos. Entre ellos está el abatimiento

del nivel del agua, el hundimiento del terreno, los cambios en la calidad del agua (ocasionado por la intrusión del agua de mar) y el desequilibrio en el balance del agua.

Como resultado de la perforación excesiva de pozos, lo cual provocó la extracción de grandes volúmenes de agua subterránea, se tienen en México, más de 30 acuíferos sobreexplotados (FIG. 4.2). Por tal motivo, en 1968, se iniciaron estudios en los que se aplica la tecnología del agua subterránea con el fin de realizar un inventario de los recursos hidráulicos subterráneos, y plantear políticas de explotación que lleven al aprovechamiento del agua subterránea en forma racional mediante un manejo adecuado de la misma.

En México, como en otras partes del mundo, se considera que el agua subterránea está constituida por dos componentes principales, el volumen renovable (recarga estacional del acuífero) y el volumen no renovable (almacenamiento del acuífero); el manejo de ambas depende entre otras cosas, de la determinación del potencial que tenga cada uno y además de la existencia o falta de fuentes alternativas que permitan realizar el uso conjunto de los recursos hidráulicos existentes.

- *Sobreexplotación.* - Se presenta cuando se tiene una explotación intensiva, en la cual el volumen de agua extraída del acuífero sobrepasa la recarga permanente¹; consiste fundamentalmente en la extracción del agua que constituye el almacenamiento del acuífero.

¹ *Recarga permanente.* - Se considera cuantitativamente como la recarga total del acuífero en forma periódica.

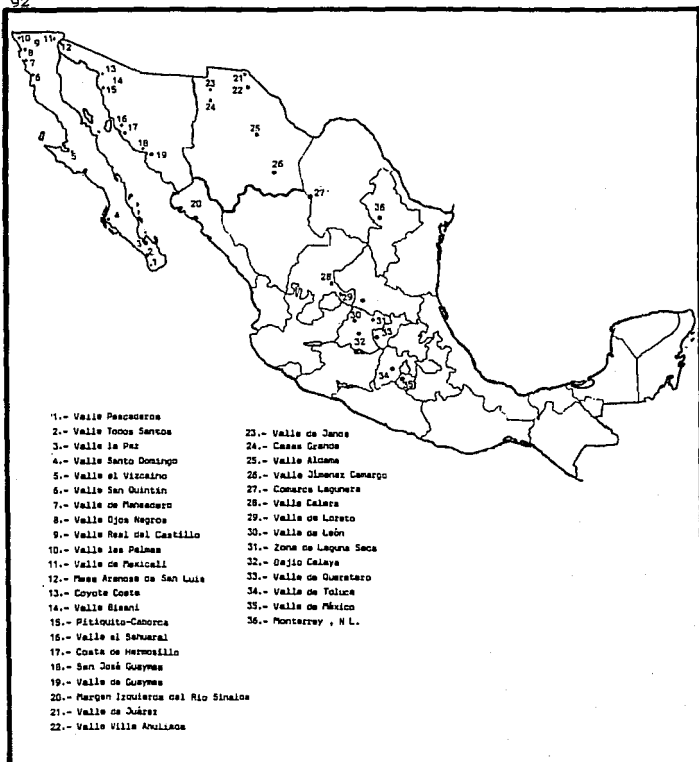


FIG. 4.2 ZONAS CON PROBLEMAS DE EXPLORACION EXCESIVA DEL AGUA SUBTERRANEA EN LA REPUBLICA MEXICANA, (Referencia 18).

Cuando la extracción del agua no se lleva a cabo en forma racional, producirá diferentes tipos de problemas, entre los que se tienen:

- 1- Abatimiento progresivo en los niveles piezométricos.
- 2- Agotamiento del suministro de agua o deficiencia en el mismo.
- 3- Intrusión salina en acuíferos costeros o migración de aguas de mala calidad.
- 4- Problemas legales por afectaciones.
- 5- Reducción del escurrimiento base en corrientes perennes.
- 6- Formación de grietas.
- 7- Asentamiento del terreno (hundimiento).
- 8- Incremento en los costos de bombeo.

En la actualidad, la tendencia en el manejo de acuíferos, se enfoca a determinar niveles máximos y mínimos del agua, con el fin de regular la capacidad de su almacenamiento, coadyuvando con esto al desarrollo de actividades económicas que de otra manera no podrían realizarse. Dentro de este planteamiento siempre debe tenerse en mente los efectos que podrían generarse en el comportamiento de los acuíferos, a fin de evitar que se lleguen a producir colapsos económicos al no poder restituir las condiciones originales con las que se inició la explotación del agua subterránea.

Ante los problemas que trae consigo la sobreexplotación, la función de los hidrólogos y de los planificadores se puede plantear de la siguiente manera:

- *Papel del hidrólogo.* - Cuantificar los recursos hidráulicos

disponibles dentro de una zona (superficial y subterránea) llevándolos hasta la simulación de su funcionamiento.

- *Papel de los planificadores.* - Ver los aspectos legales y restrictivos respecto al uso del agua de acuerdo a los sectores que lo demanden y hacer la distribución óptima desde un punto de vista socio-económico.

De especial interés para los planificadores de los países en desarrollo, es el concepto de rendimiento de sobreexplotación permisible, que es el máximo volumen de agua almacenada que puede ser económica y legalmente extraída y usada con fines benéficos sin acarrear algún efecto indeseable.

En las FIG. 4.3, 4.4 y 4.5 se presenta un modelo conceptual de cómo puede manejarse un almacenamiento de agua subterránea. Este modelo muestra el desarrollo mediante una gráfica de incremento de la carga de bombeo contra el tiempo. Una situación estática se desarrolla bajo el concepto de "rendimiento seguro" (FIG. 4.3), en el que el volumen de extracción es igual al volumen de recarga permanente menos el volumen de descarga natural no interceptada. La representación gráfica de las extracciones que resulta del desarrollo del agua contra el tiempo, produce una situación estática comparable siempre que no haya avances tecnológicos apreciables.

Sólo el volumen de agua representado por este modelo puede ser asignado a los propietarios como derechos en perpetuidad, y comúnmente se dice que la cuenca está totalmente apropiada, aunque todavía contenga grandes volúmenes de agua y, como es amenudo el caso, todavía haya descarga natural de la cuenca.

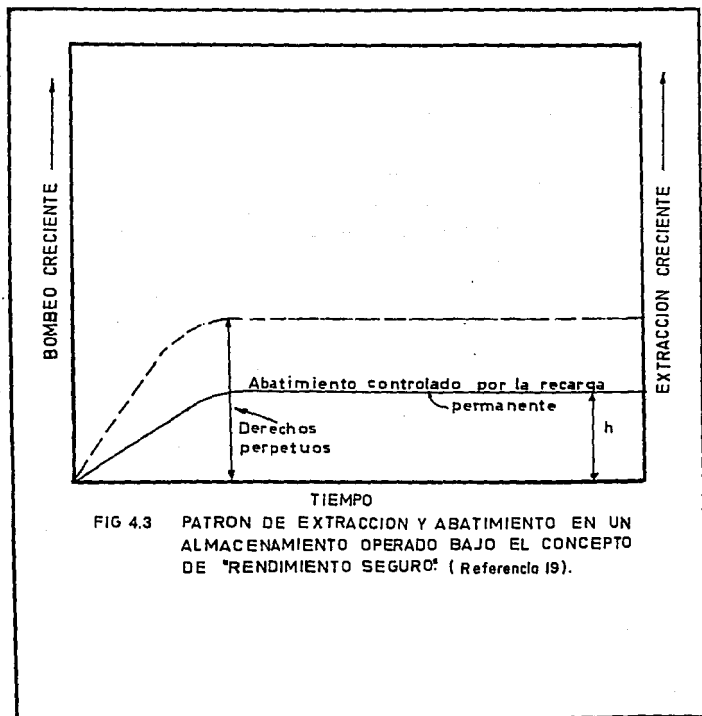


FIG 4.3 PATRON DE EXTRACCION Y ABATIMIENTO EN UN ALMACENAMIENTO OPERADO BAJO EL CONCEPTO DE "RENDIMIENTO SEGURO" (Referencia 19).

La FIG. 4.4, muestra el caso teórico en que se permite la extracción de agua aunque exceda la recarga permanente hasta que se alcanza un nivel de agua dado en la cuenca, momento en el que la extracción es disminuida al volumen igual al rendimiento permanente menos las pérdidas por descarga natural, si la hay.

Si se superpone ésta figura con la FIG. 4.3 (FIG. 4.5), es aparente que puede haber un desarrollo más eficiente del almacenamiento con este proceso, siempre que las limitaciones físicas del acuífero lo permitan.

En la FIG. 4.5, la zona achurada, representa la extracción adicional que resulta del bombeo del almacenamiento (P_0) más un incremento de los derechos perpetuos (P'), resultado de una captación más eficiente de la descarga natural. Este volumen adicional se logra a costa de aumentar la carga de bombeo del nivel controlado por el rendimiento permanente original (h) al nivel que resulta de bombear temporalmente agua del almacenamiento (h'). En algunos casos es concebible que este costo pueda ser compensado por los valores recibidos de P' , que pueden considerarse un incremento de los derechos y designaciones de métodos analíticos propios que usan datos técnicos accesibles en el almacenamiento de agua subterránea, y los datos económicos pueden producir un análisis de optimización que indicara hasta qué grado debe desarrollarse un almacenamiento bajo un conjunto de circunstancias dadas. En su forma más simple, esta aproximación analítica puede expresarse como una carga de bombeo.

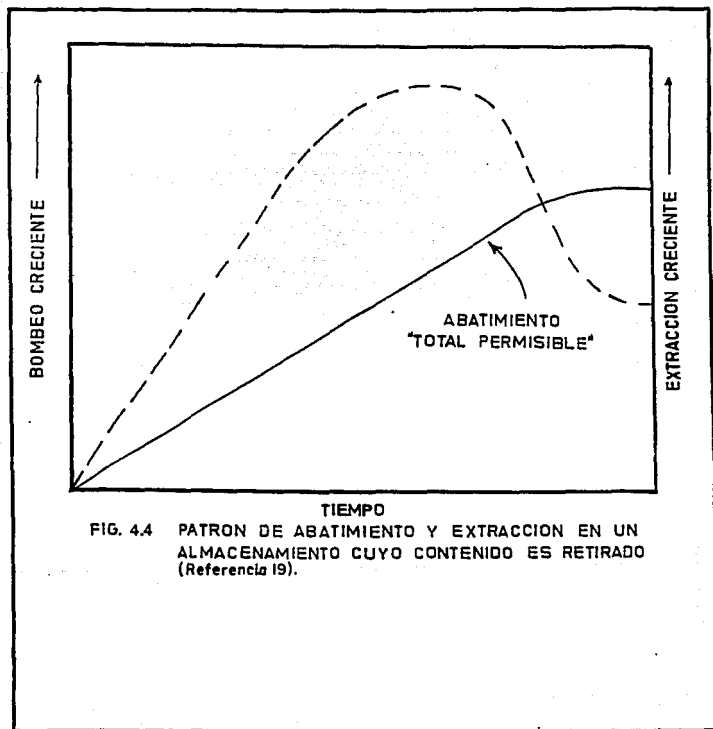


FIG. 4.4 PATRON DE ABATIMIENTO Y EXTRACCION EN UN ALMACENAMIENTO CUYO CONTENIDO ES RETIRADO (Referencia 19).

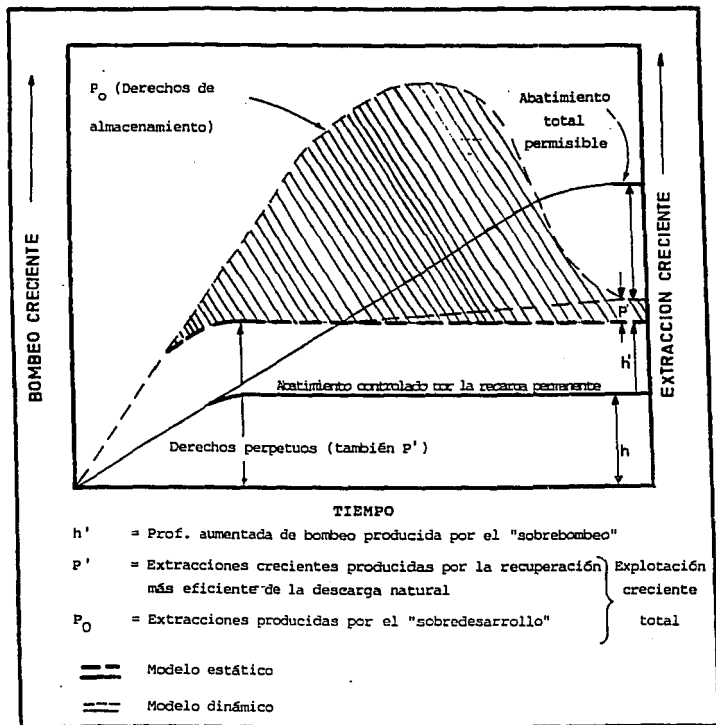


FIG. 4.5 COMPARACION DE LAS FIGURAS 4.3 Y 4.4, (Referencia 19).

$$h' = \frac{c}{m.c.} - \frac{R}{\gamma} k \quad (4.9)$$

o como un volumen de almacenamiento utilizable:

$$Am = \frac{c}{m.c.} k - \frac{R}{\gamma} \quad (4.10)$$

donde h' = nivel en la cuenca en que es más redituable interrumpir la sobreexplotación y bombear sólo la recarga permanente.

c = beneficio económico por metro cúbico cuando se bombea de h .

$m.c.$ = costo de elevar un metro cúbico de agua.

k = abatimiento del nivel del agua por metro cúbico de extracción.

R = recarga permanente.

γ = tasa de interés.

Am = almacenamiento total utilizable, que constituye los derechos de almacenamiento de la FIG. 4.5.

Los datos anteriores permiten la formulación de un plan de optimización si se conocen el uso del agua y el tiempo de extracción del almacenamiento. También pueden ser tomados en cuenta los factores físicos que pueden restringir el desarrollo, como la degradación de la calidad o el hundimiento del terreno, introduciendo otros factores en la ecuación.

Para llevar a cabo dicha planeación se requiere una apreciación cuidadosa y la comprensión de las características físicas de cualquier cuenca de agua subterránea. Deben conocerse la geometría y las características del almacenamiento de agua subterránea del acuífero, la recarga artificial o natural y la descarga. Deben estimarse o evaluarse los usos a que se destinará el agua y el periodo óptimo para llevar a cabo la sobreexplotación. También debe ser considerada y estimada la degradación potencial del agua subterránea y sus efectos colaterales, como el hundimiento que podría resultar de la sobreexplotación.

4.2.1.- ALTERNATIVAS PARA EVITAR PROBLEMAS EN LOS ACUIFEROS A CAUSA DE LA SOBREEXPLOTACION.

Con el fin de que los problemas generados por la sobreexplotación no progresen agravando cada vez más la economía de las zonas afectadas, ha sido necesario resolver graves problemas de manejo, mediante soluciones tales como:

- 1- Reducir las extracciones hasta un volumen del orden de la recarga permanente o rendimiento seguro (máximo volumen de extracción que no produce abatimiento indefinido ni daños irreparables al acuífero). En caso que esto no sea posible, por lo menos reducir la magnitud de los efectos indeseables con el fin de alargar la vida útil de los acuíferos, aplicando medidas correctivas como implantación de vedas rígidas que no permitan

que incrementen las extracciones en los aprovechamientos existentes, ni perforaciones de nuevos pozos.

2- Redistribución de las captaciones para reducir la velocidad de abatimiento.

3- Incremento de la recarga mediante infiltración artificial.

4- Importación de agua desde cuencas vecinas.

5- Relocalización de captaciones a distancias mayores del litoral en el caso de acuíferos costeros.

6- Uso de modelos de predicción del comportamiento de los alternativas de explotación que permiten definir las más convenientes, tanto en el aspecto hidrogeológico como en el económico.

7- Promover campañas de concientización donde se propongan alternativas para el mejor uso del agua, y en donde se establezca un reglamento legal y administrativo para la explotación de acuíferos.

8 -Proveer los elementos técnicos e institucionales necesarios para regular firmemente las aguas subterráneas.

9- En los casos que sea necesario, realizar o concluir el inventario de la disponibilidad de aguas subterráneas y mantenerlo actualizado; así mismo, llevar a cabo los estudios de gran visión, detallados e interdisciplinarios que se requieran.

10- Identificar las posibilidades y establecer los mecanismos para cambiar el uso del agua superficial y subterránea de una actividad a otra que ofrezca mejores perspectivas sociales y económicas.

- 11- Aliviar problemas de sobreexplotación de acuíferos implantando técnicas de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas y recarga artificial.
- 12- Reforzar la toma sistemática de información simultáneamente con la explotación de los acuíferos, cubriendo aspectos cuantitativos y de calidad.
- 13- Establecer la coordinación entre dependencias que manejan información hidrológica en todos sus aspectos, y uniformizar o hacer disponible la información que se reuna mediante bancos de información, de ser posible a nivel local y estatal.
- 14- Promover la mayor participación y cooperación de los usuarios en la selección e implantación de programas para el aprovechamiento del agua subterránea.
- 15- Restringir la descarga de desechos, tanto en la superficie como en el subsuelo, de acuerdo a las características de los sistemas de flujo de aguas subterráneas de tal forma que garantice la calidad del agua de los acuíferos.

Lo expuesto anteriormente se puede alcanzar mediante el establecimiento de "Distritos de Conservación y Manejo de Aguas Subterráneas" a través de los cuales se impulse la correcta implantación de las políticas propuestas, de tal manera que se considere la naturaleza regional o local de los problemas derivados de la explotación excesiva o intensiva de las aguas subterráneas.

4.2.2.- ALTERNATIVAS DE EXPLOTACION

A fin de llevar a cabo la adecuada explotación de los recursos de agua subterránea, en términos generales, se puede tener en consideración las siguientes alternativas de explotación:

a) Determinación del volumen de extracción en función de las características de la estructura de los acuíferos (tipo de) y tiempo de explotación con el fin de hacer proporcionales las descargas con los descensos, evitando las concentraciones excesivas de pozos; debiéndose buscar la distribución uniforme.

b) Buscar abatir niveles en las zonas en donde éstos se encuentren muy cerca de la superficie del suelo, para evitar pérdidas innecesarias por evaporación o transpiración de plantas no productivas.

c) Aprovechamiento de las salidas naturales de los acuíferos cuando éstos no sean aprovechados aguas abajo de los sitios de captación (salida horizontal y flujo base).

d) Definir niveles de explotación económicamente factibles de acuerdo al uso o usos a que se destine el agua.

e) Emplear el agua subterránea de acuerdo a las condiciones hidrológicas y socioeconómicas de las zonas de explotación, haciendo un uso alternado entre los periodos de lluvias excedentes y los periodos de sequía, dejando que se realice la recuperación de los acuíferos cuando así lo permita la disponibilidad de agua superficial.

f) Realizar cambios en el uso del agua cuando éstos redunden en mayores beneficios socio-económicos.

g) Buscar la transferencia de agua de áreas subyacentes en las que haya excedentes de agua entre una y otra.

h) Inducir sistemas de recarga artificial en aquellos casos que sea factible.

4.3.- POROSIDAD Y PERMEABILIDAD

El peso de los sedimentos de una formación va creando una compactación de las partículas del material, creándoles cierto tipo de deformación: aumento en el área de contacto entre partículas, (FIG. 4.6 a); si existen partículas laminares o laminares se flexionará como se indica en la FIG. 4.6 b, además existirá un deslizamiento entre ellas, FIG. 4.6c. Todas estas deformaciones traen por consiguiente un cambio en la porosidad y permeabilidad del material, el cual estará en función del tipo de roca, profundidad del acuífero, granulometría, material cementante, arreglo de los granos y el excesivo bombeo de líquidos del subsuelo.

Se pueden distinguir diferentes tipos de porosidades en una formación:

- porosidad primaria.
- porosidad secundaria.
- porosidad eficaz.

Porosidad primaria. Este tipo de porosidad comprende los intersticios originales que quedaron al finalizar el proceso de formación de la roca.

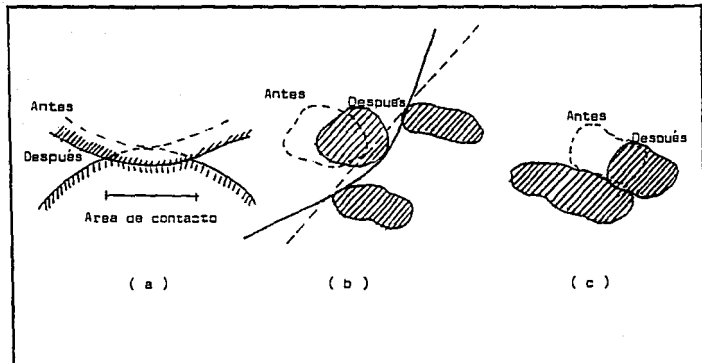


FIG. 4.6 DEFORMACIONES QUE SUFREN LAS PARTICULAS EN UN ACUIFERO, (Referencia 15).

Porosidad secundaria. - Comprende a la porosidad que resulta de diversos procesos secundarios que afectaron la roca, como por ejemplo: fallas, fracturas o disoluciones.

Porosidad eficaz. - Comprende a la porosidad que sólo toma en cuenta el volumen de poros intercomunicados (V_e), respecto al volumen total de roca considerado (V_t), es decir:

$$n_e = \frac{V_e}{V_t} \quad (4.11)$$

En estudios de movimiento del agua subterránea sólo importan los poros intercomunicados, por lo que sólo se tomará en cuenta la porosidad eficaz.

Permeabilidad absoluta (K). - Es la propiedad que tiene la roca de permitir el paso de un fluido a través de ella, cuando se encuentra saturada al 100% del fluido.

Permeabilidad efectiva (kw). - Es la permeabilidad del medio a un fluido en particular cuando su saturación es menor del 100 por ciento.

Permeabilidad relativa - Es la relación que existe entre la permeabilidad efectiva y la absoluta, es decir:

$$K_{rw} = \frac{k_w}{K} \quad (4.12)$$

En la tabla 4.1 se presentan rangos de valores de permeabilidad de algunas rocas representativas de las formaciones.

Tabla 4.1.- Rangos de valores de permeabilidad.

Permeabilidad (m/día)	10^4	10^3	10^2	10^1	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena limpia, mezcla de grava y arena			Arena fina, arena arcillosa, mezcla de arena, limo y arcilla			Arcilla no meteorizada		
Clasificación	Buenos Acuíferos					Acuífero pobre			Impermeable		
Capacidad de drenaje	Drenan bien					Drenan mal			No drenan		

Otra forma de definir la permeabilidad es a partir de la ley de Darcy, y haciendo referencia en la ecuación (4.5):

$$Q = Av = Ak \frac{h}{L}$$

Despejando k, entonces:

$$k = \frac{Q}{A \left(\frac{h}{L} \right)} = \frac{Q}{A \left(\frac{h_1 - h_2}{L} \right)} = \frac{Q}{A i} \quad (4.13)$$

por lo que se concluye que la permeabilidad es la cantidad de agua que pasa por unidad de área, bajo un gradiente hidráulico unitario.

Con lo escrito anteriormente se puede decir que la porosidad determina la cantidad de agua que puede almacenarse y la permeabilidad la facilidad con que ésta puede moverse. La tabla 4.2 muestra una clasificación general de algunos tipos de rocas en función de su porosidad y de su permeabilidad.

Tabla 4.2.- Propiedades acuíferas de algunas rocas comunes.
(Referencia 18)

Permeabilidad	Porosidad
Permeabilidad máxima	Porosidad máxima
Gravas bien clasificadas	Arcillas blandas
Basaltos porosos	Limos
Caliza karstificada	Tobas
Arenas bien clasificadas	Arenas bien clasificadas
Arenas y gravas mal clasificadas	Arenas y gravas mal clasificadas
Rocas cristalinas fracturadas	Areniscas
Limos y tobas	Basalto poroso
Arcillas	Caliza karstificada
Roca cristalina masiva	Roca cristalina porosa
	Roca cristalina masiva
Permeabilidad mínima	Porosidad mínima

4.3.1.- MECANISMOS QUE GOBIERNAN LA VARIACION DE LA POROSIDAD Y PERMEABILIDAD

La disminución que sufre la porosidad y permeabilidad de los acuíferos es un grave problema que afecta notablemente el funcionamiento de éstos, ya que se ve reducida considerablemente la capacidad de almacenamiento del agua. Este problema surge de varios mecanismos, los cuales se clasifican en dos grupos: el primero son los mecanismos naturales como, la compactación de los sedimentos (por el peso de la formación), la meteorización o esfuerzos tectónicos, y

el segundo grupo son los mecanismos "inducidos" ocasionados por la sobreexplotación del agua subterránea como el hundimiento y el fracturamiento.

4.3.1.1.- MECANISMOS NATURALES

a) Variación de la porosidad:

La porosidad total de las rocas compactas puede ser afectada considerablemente por la meteorización y la fracturación por esfuerzos tectónicos, los cuales tienden a elevarla. En las arcillas el efecto de disminución de porosidad por compactación es muy importante y crece rápidamente con la profundidad, en general de forma exponencial.

La porosidad eficaz está muy afectada por la distribución del tamaño de granos y por la presencia de arcillas y su estado de hidratación. Los datos que se presentan a continuación (tabla 4.3) son una expansión de la tabla 4.2 y corresponde a los materiales aluviales más frecuentes.

Tabla 4.3.- Porosidad de algunos materiales aluviales más frecuentes

Material	Porosidad eficaz %		
	Max	Min	Media
Arcilla arenosa	12	8	7
Arena fina	28	10	21
Arena media	32	15	20
Arena gruesa	35	20	27
Arena con grava	35	20	25
Gravas finas	35	21	25
Gravas medias	26	13	19
Gravas gruesas	26	12	22

La forma angular de las partículas afecta a la porosidad incrementándola en algunos casos y disminuyéndola en otros, según la agrupación resultante tienda a los contactos puntuales o al empaquetamiento.

Cuanto mayor sea el número de diámetros presentes en el material total la porosidad será menor, ya que las partículas pequeñas tenderán a ocupar los huecos existentes entre las mayores.

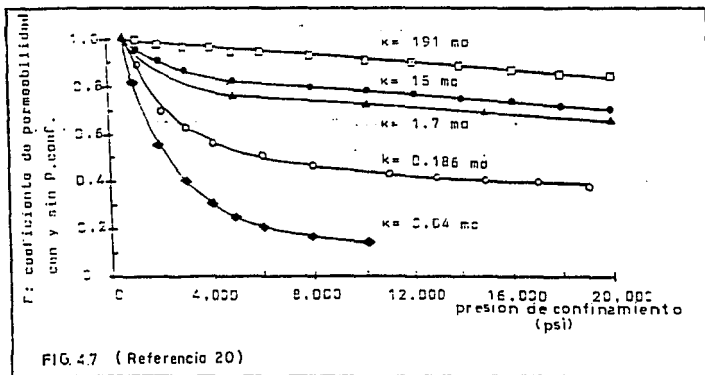
El arreglo de granos es otra limitante que altera esta propiedad; este arreglo consiste en la forma geométrica que desarrollan las partículas del material al ser depositado. Por ejemplo, para el caso del arreglo cúbico se tendrá una mayor porosidad (47 %) comparada con la del arreglo ortorrómbico cuya porosidad total es de 40 % (39.54 %) y con la del arreglo romboédrico (aprox. 26 %). Estas porosidades se aplican solamente a las partículas perfectamente esféricas.

b) Variación de la permeabilidad:

La porosidad es un factor importante que afecta la permeabilidad, de aquí que los factores antes descritos estén íntimamente ligados con la variación de permeabilidad.

El flujo no puede tener lugar a través de medios porosos, a menos que los conductos en el material estén comunicados, es decir que exista continuidad en los poros. Como la permeabilidad es una medida del caudal en determinadas condiciones a través del medio poroso, una reducción en su continuidad resultaría en una disminución en la permeabilidad del material.

La permeabilidad absoluta se ve reducida a medida que la presión de confinamiento aumenta, este efecto es más pronunciado en rocas de baja permeabilidad. Los esfuerzos sobre la roca almacenante aumentan en la vecindad del pozo; a medida que la presión declina se reduce la permeabilidad absoluta (FIG. 4.7).



Las permeabilidades relativas son función de la geometría de los granos, el grado de uniformidad y la distribución del tamaño de los poros, principalmente para un juego de saturaciones; en menor escala también depende de la viscosidad, tensión interfacial y gradiente de presión.

El diámetro de los granos interviene también en la variación de la permeabilidad. Se ha encontrado que está en función, aproximadamente, del cuadrado del diámetro de los granos que constituyen el medio acuífero. Para un diámetro de los granos, inferior a 1/100 milímetros, el terreno es prácticamente impermeable. La fórmula general que relaciona el diámetro de los granos con el coeficiente de permeabilidad es:

$$k = C d^2 \quad (4.14)$$

donde:

k: permeabilidad, cm/seg.

d: diámetro de los poros, cm

C: constante que varía desde 45.8 para arcillas, hasta 142 para arenas puras. Se puede asignar un valor medio de 116 o incluso de 100;

entonces:

$$k = 100 d_{10}^2 \quad (4.15)$$

4.3.1.2.- MECANISMOS INDUCIDOS

La reducción de las presiones artesianas en el interior de los depósitos de los grandes valles, trae consigo una compactación de las formaciones acuíferas, de limos y arcillas adyacentes, generado principalmente por la extracción de fluidos del medio poroso, trayendo como consecuencia una reducción tanto en la porosidad como en la permeabilidad debido a que los espacios entre los granos de una arenisca o de otro acuífero sedimentario no se llenan más con agua, la presión provocada por el peso de las rocas superyacentes empaqueta los granos más estrechamente. Esto traerá como consecuencia que se reduzca permanentemente la capacidad del acuífero.

4.4.- HUNDIMIENTO Y FRACTURAMIENTO

Como ya se mencionó anteriormente, la extracción intensiva de los mantos acuíferos provoca, entre otros problemas, el hundimiento y fracturamiento del terreno.

a) Hundimiento:

Se entiende como hundimiento a la subsidencia del terreno, es decir, al movimiento descendente de la superficie del terreno provocado por un gran número de fenómenos, entre los que se incluyen hundimiento de cavidades subterráneas, compactación de suelos porosos, oxidación de materia orgánica, desecación de arcillas, extracción de

fluidos del subsuelo (provocando un abatimiento en los niveles piezométricos) y movimientos tectónicos. Este abatimiento de presión en los acuíferos provoca flujo de agua de los mantos arcillosos hacia ellos, con la correspondiente consolidación de las arcillas acompañado de pérdida de volumen. En el caso de la ciudad de México, el hundimiento ocurre como una función lineal del tiempo, pero es muy variable de un punto a otro de la ciudad. Por lo que es difícil hablar de una cifra representativa del hundimiento anual. Pero se han registrado en el D.F. (Xochimilco y Tláhuac) y en el Estado de México (Ecatepec, Nezahualcóyotl y Chalco) un hundimiento de hasta 30 cm/año.

Los estratos arcillosos que se encuentran a profundidades menores de 50 m son los principales responsables del fenómeno, particularmente los comprendidos entre los 20 y los 50 metros de profundidad.

El terreno asentado y fracturado produce grandes daños en estructuras, redes hidráulicas e instalaciones subterráneas, los cambios en la estructura del subsuelo comunicados con grietas o fracturas pueden comunicar zonas de mala calidad de agua, poniendo en peligro la calidad del agua.

En la FIG. 4.8 se presenta el problema del hundimiento, basado en la teoría de la consolidación de Terzaghi. Para el caso de un sólo manto de arcilla, drenado por sus caras superior e inferior, sometido a un abatimiento rápido de la presión del agua constante con el tiempo y suponiendo que el nivel freático se mantiene a la misma profundidad durante el proceso de consolidación. Este estrato de arcilla es homogéneo de espesor H y la pérdida de presión Δp ocurre en el acuífero inferior.

Antes de que ocurra el abatimiento Δp en el acuífero, las presiones se encontraban como se muestra en la FIG. 4.8(a) que corresponde a la configuración hidrostática de equilibrio, al producirse el abatimiento, el proceso de consolidación comienza y la distribución de presiones en el agua en un instante intermedio t se muestra en la FIG. 4.8(b). En la FIG. 4.8(c), al final del proceso, la distribución vuelve a ser lineal.

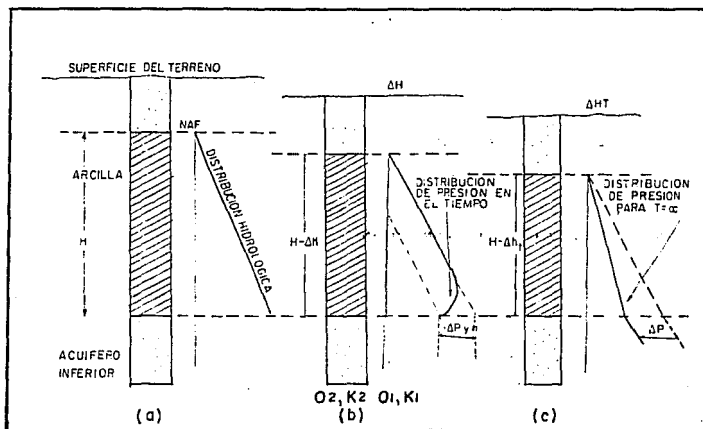


FIG. 4.8 DISTRIBUCION DE PRESION NATURAL EN UN ESTRATO DE ARCILLA CON UN ABATIMIENTO ΔP CONSTANTE EN EL ACUIFERO QUE SIRVE DE FRONTERA INFERIOR. NAF ES LA FRONTERA SUPERIOR DEL ESTRATO ARCILLOSO, H ES EL ESPESOR DE LA ARCILLA Y ΔH EL HUNDIMIENTO FINAL DE ESTRATO.

De acuerdo a la teoría de consolidación de Terzaghi, la expresión para el hundimiento del estrato de arcilla es:

$$\Delta h = \frac{H}{1+e} av \frac{\Delta p}{z} \left[1 - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} e^{-\frac{\pi^2 (2n+1)^2 T}{4}} \right] \quad (4.16)$$

donde:

- H = Espesor del estrato de arcilla.
- av = Coeficiente de compresibilidad.
- T = Factor tiempo.
- e = Base de logaritmos.
- n = Serie de números naturales.
- cv = Coeficiente de consolidación.

La expresión anterior sólo toma en cuenta las deformaciones del suelo causadas por consolidación primaria.

4.4.1.- MECANICA DEL HUNDIMIENTO

El agua almacenada en el acuífero ayuda a soportar a las formaciones suprayacentes, por medio de la presión del fluido y por la compresión actuante sobre las partículas individuales de la roca, como se observa en la FIG. 4.9. El peso de la formación situada sobre el acuífero es soportado por la presión del agua y las partículas sólidas. La extracción del fluido provoca un descenso en la presión de los pozos, reduciendo como consecuencia el apoyo proporcionado del agua al material situado arriba, cargando su peso más directamente

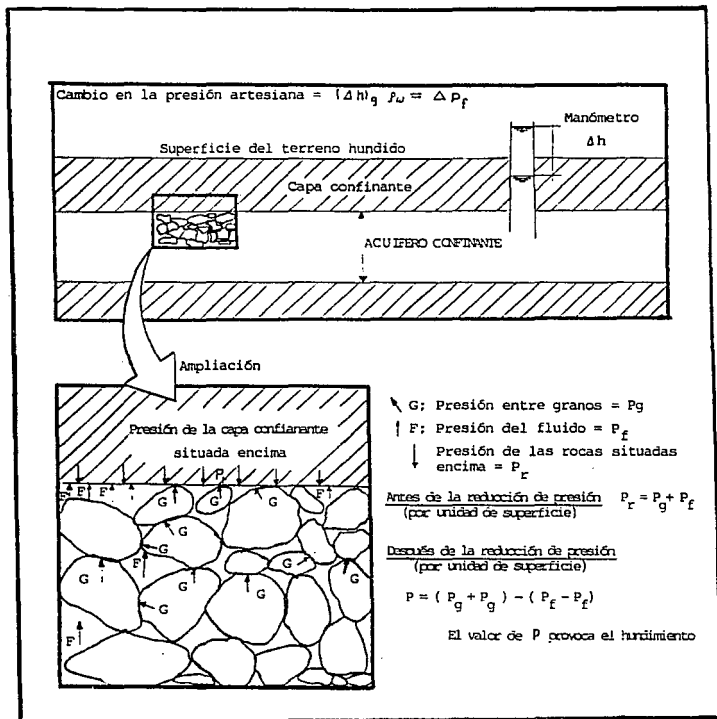


FIG. 4.9 MECANICA DEL HUNDIMIENTO, (Referencia 3).

sobre las partículas sólidas de la zona portadora del fluido. El espacio dejado por el agua extraída es ocupado por los granos de la roca subyacente, creando con esto la compactación del terreno y el consiguiente hundimiento de la formación.

Jacob (1940) mostró que un acuífero confinado elástico, no tomando en cuenta aportaciones de agua de las capas confinantes, el coeficiente de almacenamiento viene determinado por:

$$S = e\gamma b \left[\frac{1}{E_w} + \frac{C}{eEs} \right] \quad (4.17)$$

en donde,

e = porosidad (fracción decimal)

γ = peso específico por unidad de superficie; $62.4 \text{ lb pie}^{-3}/144$
 $\text{pg}^2 \text{ pie}^{-2} = 0.434 \text{ lb pg}^2 \text{ pie}^{-2}$.

b = espesor en pies.

E_w = módulo de compresibilidad de agua $3 \times 10^{-5} \text{ lb pg}^{-2}$ a temperatura ordinaria.

C = relación adimensional que puede considerarse la unidad en materiales granulares no cementados. En acuíferos de grandes masa sólidas, tales como calizas con conductos tabulares originados por disolución, C parece ser igual a la porosidad. En las areniscas, según su grado de cementación, C es próximo a uno u otro valor límite, quedando en cualquier caso comprendido entre los dos (porosidad y unidad).

Es = módulo de compresibilidad "in situ" del esqueleto sólido del acuífero (pulgada cuadrada por libra).

Posteriormente Lohman (1961) utilizó la ecuación anterior para calcular el valor de la compresión elástica experimentada por un acuífero al comienzo del bombeo:

$$\Delta b = \Delta p \left(\frac{S}{\gamma} + b n \frac{1}{E_w} \right) \quad (4.18)$$

donde:

Δb : es la reducción de espesor del acuífero.

Δp : reducción de la presión del agua en el interior del acuífero.

Esta compactación es lenta y debe ser calculada, por la teoría de consolidación de Terzaghi (1943) o por la ecuación más amplia de Biot (1941), que considera un espacio de tres coordenadas, la teoría de Terzaghi se muestra en la ecuación 4.16 o se puede escribir de la siguiente forma:

$$t = \frac{t_f b}{C} \quad (4.19)$$

donde:

t = Tiempo necesario para alcanzar un cierto porcentaje de la compactación total.

t_f = Factor tiempo relacionado con el porcentaje de

compactación.

b = Espesor de la capa.

C = Coeficiente de compactación relacionado con la porosidad y permeabilidad del material.

La ecuación de Biot es de la forma:

$$\frac{\Delta b}{b} = 1 - \frac{8}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{1/\tau} \quad (4.20)$$

donde:

$$A_n = \frac{1}{(2n+1)^2}$$

τ = Constante de tiempo relacionada con las características de la compactación y el cuadrado del espesor de la capa compactada.

4.4.2.- FRACTURAMIENTO

El difícil subsuelo del valle en el que se encuentra localizada la ciudad de México presenta múltiples problemas geotécnicos. Uno de los más importantes, en los últimos años, es el agrietamiento del subsuelo en diferentes zonas de la ciudad, ocasionado principalmente por el descenso de los niveles piezométricos de los acuíferos, como consecuencia de la excesiva extracción del agua subterránea.

El fenómeno de fracturamiento implica la generación de una grieta con la pérdida de contacto entre las dos partes del cuerpo y su

propagación hasta que se presenta la falla general o que se alcance un nuevo estado de equilibrio.

4.4.2.1- MODOS DE AGRIETAMIENTO

El frente de una grieta es el vertice que conecta los puntos adyacentes donde ocurren o pueden ocurrir separaciones subsecuentes. Durante un proceso de separación continua, esta línea se mueve a lo largo de un plano geométrico llamado superficie de fractura. El área de la superficie de fractura se incrementa con el crecimiento de la grieta.

De acuerdo con Irwin (Hellan, 1984), existen tres modos básicos de desarrollo de agrietamiento (FIG. 4.10).

a) Modo I

Se presenta una abertura simétrica; el desplazamiento relativo entre las caras correspondientes es perpendicular a la superficie de fractura; las grietas se generan por tensión, separándose entre si las caras de las grietas.

b) Modo II

La separación es asimétrica con desplazamientos tangenciales relativos perpendiculares al frente de la grieta; el agrietamiento se genera por el esfuerzo cortante; las caras de las grietas se deslizan una sobre la otra en dirección perpendicular al vertice.

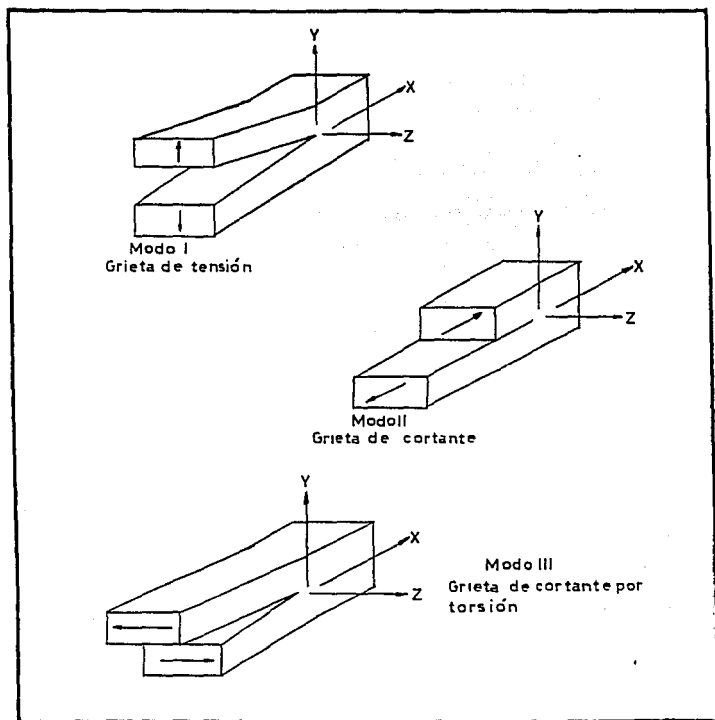


FIG. 4.10 MODOS DE AGRIETAMIENTO, (Referencia 15).

c) Modo III

La separación es nuevamente asimétrica, con desplazamientos tangenciales relativos, paralelos al frente de la grieta, bajo el efecto de esfuerzos inducidos por torsión, las superficies de las grietas se deslizan una sobre la otra, en dirección paralela al vertice.

En general, en un cuerpo homogéneo, el agrietamiento puede ser descrito por alguno de estos modos o sus combinaciones. Sin embargo, el crecimiento de la grieta usualmente tiene lugar en el modo I o cerca de él.

4.4.2.2.- ESFUERZOS EJERCIDOS EN LA FORMACION

a) Esfuerzos totales principales:

Las condiciones naturales de formación de las capas terrestres conlleva a la generación de un estado de esfuerzos natural, el cual se crea por el peso de los sedimentos. Considerese un elemento cualquiera como el indicado en la FIG. 4.11, el cual estará sujeto a una carga geoestática E_1 , esfuerzo total vertical, llamado también "presión de sobrecarga", debida al peso de los sedimentos superpuestos. Este esfuerzo genera en el elemento considerado otros dos esfuerzos totales horizontales, perpendiculares entre sí y que en condiciones naturales serán iguales, E_2 y E_3 .

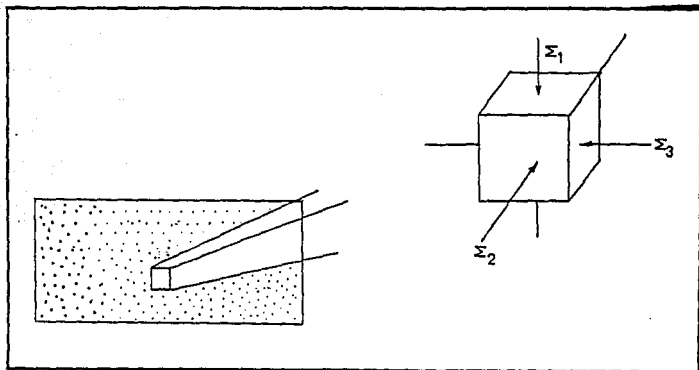


FIG 4.11 (Referencia 21).

A cada uno de estos esfuerzos Σ_1 , Σ_2 y Σ_3 le corresponderá una reacción de igual magnitud pero de sentido contrario. Si el peso específico promedio de los estratos (γ), se proporciona en (gr/cm^3) y la profundidad del elemento considerado (D), en (m), se tiene:

$$\Sigma_1 [\text{kg/cm}^2] = \frac{1}{10} \gamma [\text{gr/cm}^3] D [\text{m}] \quad (4.21)$$

En lo general γ para las rocas comunes varía entre 2 y 2.6 gr/cm^3 dependiendo de la profundidad a la que se encuentra.

Bajo este estado natural de esfuerzos $\Sigma_2 = \Sigma_3$ y este valor puede calcularse por medio de la ley de Hooke (en tres dimensiones) mediante:

$$\Sigma_2 = \Sigma_3 = \Sigma_1 \frac{\nu}{1-\nu} \quad (4.22)$$

donde ν es la relación de Poisson.

El estado natural de esfuerzos así definido raramente se tiene en el subsuelo. debido a la evidencia que presentan las formaciones de estar o haber estado sujetas a fuerzas tectónicas (presencia de plegamientos, fallas, fracturas, etc.), distorsionando los valores de Σ_2 y Σ_3 , teniéndose por lo general:

$$\Sigma_1 \neq \Sigma_2 \neq \Sigma_3$$

sólo en el caso que la región geológica esté tectónicamente en reposo: $\Sigma_2 = \Sigma_3$ pudiéndose aplicar la ecuación 4.22 siendo Σ_1 calculable en cualquier caso.

b) Esfuerzos principales efectivos:

Como se sabe, las formaciones de interes son porosas y permeables conteniendo fluidos a presión; en estas condiciones y considerando la FIG. 4.12 se tiene:

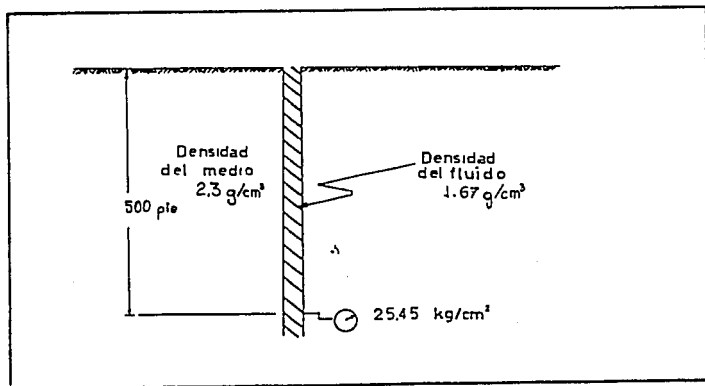


FIG 4.12 (Referencia 21).

se define σ_1 el esfuerzo vertical efectivo, como:

$$\sigma_1 = \Sigma_1 - P_f \quad (4.23)$$

donde P_f es la presión del fluido en el medio poroso

En general:

$$\sigma_i = \Sigma_i - \alpha P_f \quad ; \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.24)$$

donde α es un parámetro experimental aproximado a la unidad (para calizas $\alpha \approx 1.0$, para areniscas $0.85 < \alpha < 1.0$).

En este caso:

$$\Sigma_1 = \frac{2.3 \left(\frac{500}{2.28} \right)}{10} = 35.06 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_1 = \Sigma_1 - P_f = 35.06 - 25.45 = 9.61 \text{ kg/cm}^2$$

En general se consideran como esfuerzos efectivos horizontales a σ_2 y σ_3 , haciendo la convención siguiente: $\sigma_2 > \sigma_3$.

Con lo anterior se puede concluir que:

- El esfuerzo vertical podrá siempre calcularse estimando la densidad media de los estratos y la presión del acuífero.
- Los esfuerzos efectivos horizontales solo podrán estimarse si se considera que la zona geológica se encuentra tectónicamente en reposo, lo que significa que: $\sigma_2 = \sigma_3$. Para este caso, aplicando la ley de Hooke en tres dimensiones:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1 \frac{\nu}{1-\nu} \quad (4.25)$$

4.4.2.3.- FORMACION DE LA FRACTURA

Como la formación está saturada con fluidos a presión, constituye un sistema de esfuerzos roca-fluidos, el conjunto de esfuerzos existentes en este sistema puede dividirse en dos esfuerzos principales: 1) la presión que prevalece en el fluido y actúa sobre los componentes sólidos del sistema y 2) un esfuerzo adicional que actúa exclusivamente sobre la parte sólida de la formación. El esfuerzo total es la suma de estos dos.

Si en estas condiciones se extrae el agua contenida en los poros (agua almacenada) el sistema de esfuerzos quedará en desequilibrio, puesto que la presión del fluido en el poro declinará. Con esto, el esfuerzo principal vertical aumentará (ver ec. 4.23) provocando una compactación de los sedimentos.

A medida que se reduce la presión del fluido (excesivo bombeo de los pozos), existirá un incremento adicional en la presión interna ocasionada por la presión ejercida de los sedimentos, provocando el tensionamiento de la roca en esa dirección. Cuando se exceda la resistencia a la tensión de la roca ésta se fracturará a lo largo del plano perpendicular a su mínimo esfuerzo principal.

Una vez formada la fractura existirá un deslizamiento entre los bloques a través del plano de fractura, el bloque deslizado ocupará los espacios vacíos dejados por el fluido, provocando un hundimiento de alguno de los bloques. Este hundimiento estará en función del peso de los sedimentos y de la cantidad de agua almacenada extraída.

4.5.- ELASTICIDAD DEL ACUIFERO

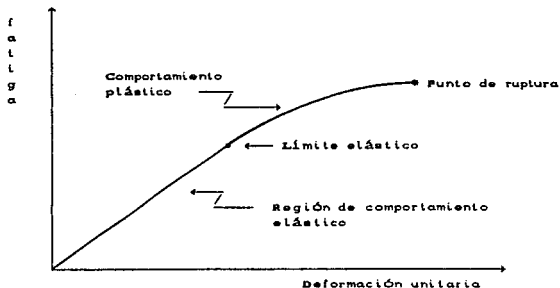
En términos generales se entiende por *elasticidad*, la propiedad que tienen algunos materiales sometidos a los esfuerzos y deformaciones, de recuperar su forma original, dentro de ciertos límites, al desaparecer los efectos de los esfuerzos.

Esta definición está íntimamente ligada al concepto de módulo elástico, que relaciona a los esfuerzos con las deformaciones unitarias.

$$\text{Módulo elástico} = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación unitaria}}$$

Se entiende por módulo elástico, la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación, siendo proporcionales dentro de ciertos límites que se determinan elásticos.

Este comportamiento se ejemplifica con la conocida Ley de Hooke.



Al incrementar los esfuerzos las deformaciones aumentarán proporcionalmente, mientras no se rebase el punto de límite elástico. Si se continuara incrementando los esfuerzos las deformaciones ya no serán proporcionales y al desaparecer los esfuerzos quedarán algunas deformaciones permanentes. Si el incremento de los esfuerzos alcanza el punto de ruptura, el cuerpo se rompe.

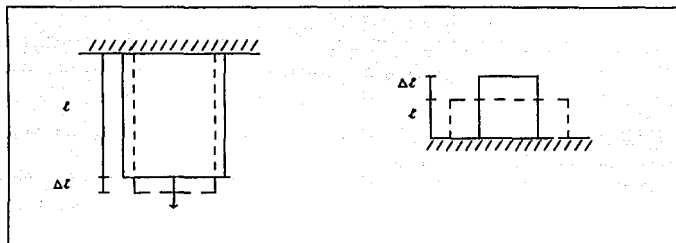
Se conocen tantos tipos de módulos elásticos, como tipos de deformaciones puede tener un cuerpo.

$$\text{Deformación unitaria} = \frac{\text{Deformación total}}{\text{Longitud original}}$$

Se pueden considerar dos tipos básicos de deformaciones

Deformaciones longitudinales {
Conservando el volumen
Variando el volumen

Deformaciones longitudinales conservando el volumen. Son producidas por esfuerzos de tensión y compresión.



Si se conserva el volumen, se originan deformaciones en el sentido transversal para compensar las deformaciones en el sentido longitudinal.

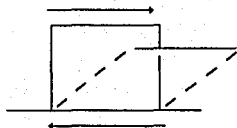
$$\text{Módulo de Young (E)} = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación unitaria}}$$

$$\text{Relación de Poisson } (\nu) = \frac{\text{deformación transversal}}{\text{deformación longitudinal}}$$

Para conservar el volumen $\nu \leq 0.5$

Deformaciones angulares

$$\text{Rigidez } n = \frac{\text{Esfuerzo cortante}}{\text{Deformación angular}}$$



Deformación longitudinal con variación de volumen.

Este tipo de deformación se obtiene cuando los esfuerzos están uniformemente distribuidos, como el caso de una prensa hidráulica.

$$\text{compresibilidad} = \frac{\text{Variación de presión}}{\text{Variación de volumen}}$$

En las rocas que forman la tierra, las constantes elásticas tienen valores del orden siguiente:

Módulo de Young	10^{11} a 10^{12} dinas/cm ²
Relación de Poisson	0.25 a 0.33
Rigidez	10^{10} a 10^{12} dinas/cm ²
Compresibilidad	10^{10} a 10^{11} dinas/cm ²

La teoría de la elasticidad se apoya en el comportamiento de un cuerpo sujeto a esfuerzos a deformaciones simultáneas.

La compresión elástica de un acuífero, efecto motivado por la disminución gradual de la presión que soporta el peso de la formación confinante.

En acuíferos confinados elásticos, haciendo referencia a la ecuación 4.17:

$$S = n\gamma b \left[\frac{1}{E_w} + \frac{C}{nE_s} \right]$$

Para los valores que C puede considerarse igual a la unidad, la ecuación suele expresarse como sigue:

$$S = n\gamma b \left[\beta + \frac{\alpha}{n} \right] \quad (4.26)$$

en donde,

$$\beta = 1 / E_w = 3.3 \times 10^{-5} \text{ pg}^2/\text{lb}$$

$$\alpha = 1 / E_s ; \text{ en } \text{pg}^2/\text{lb}$$

El recíproco del módulo de elasticidad del acuífero, α , puede obtenerse de la ecuación (4.26) si se conocen S y los restantes términos.

Para acuíferos confinados elásticos en los que C puede suponerse igual a la unidad las ecuaciones (4.17) y (4.26) pueden expresarse en la forma:

$$\frac{b}{E_s} = \frac{S}{\gamma} - nb\beta \quad [L^2M^{-1}T^2] \quad (4.27)$$

y que la ley de Hooke (deformación proporcional al esfuerzo en el

intervalo elástico) conduce a:

$$\Delta b = \frac{b}{E_s} \Delta P \quad (4.28)$$

en donde;

Δb = cambio producido en b , en pies.

ΔP = cambio en la presión artesiana (disminución generalmente),
lb/pg².

combinando las ecuaciones (4.27) y (4.28) se obtiene:

$$\Delta b = \Delta P \left[\frac{S}{\gamma} - nb\beta \right] \quad (4.29)$$

La ecuación (4.29) permite calcular la variación del terreno, Δb , para una determinada variación de presión, ΔP , en un acuífero confinado elástico del que se conozcan S , n y β .

Los depósitos y lentejones arcillosos o de arcillas limosas, intercalados en los acuíferos confinados o en los yacimientos petrolíferos y en las formaciones confinantes asociadas a los mismos, son mucho más porosos que las arenas o gravas que coexistan asociadas a la formación; por esta razón contienen más cantidad de fluido por unidad de volumen para una presión de fluido dada. Cuando la presión se reduce gradualmente, como ocurre ante el bombeo continuo en pozos, tales depósitos ceden fluido lentamente sufriendo una compactación inelástica (plástica) generalmente irreversible.

No

Existe

Página

5.- METODOLOGIA DE LA REHABILITACION

5.1.- ESTRATEGIAS PARA LA REHABILITACION DE ACUIFEROS

El primer paso para desarrollar una estrategia de rehabilitación es la evaluación preliminar del problema; con lo cual se seleccionará la estrategia más óptima de acuerdo a una serie de factores de decisión, impacto ambiental y análisis del costo efectivo. La implatantación y construcción de la alternativa seleccionada es seguida por un monitoreo eficaz.

En la FIG. 5.1 se describe el diagrama de flujo para la decisión y elaboración de la alternativa a seguir en la rehabilitación del acuífero. El orden general de los pasos a seguir es importante debido a que ninguno de ellos es independiente, el proceso puede ser iterativo.

5.1.1.- ACTIVIDADES PRELIMINARES

Las actividades preliminares incluyen: un grupo multidisciplinario, definición y caracterización del problema, evaluación de datos y datos requeridos a través de un estudio preliminar.

ESQUEMA CONCEPTUAL PARA LA TOMA DE DECISION
DE ALTERNATIVAS EN LA REHABILITACION DE UN ACUIFERO

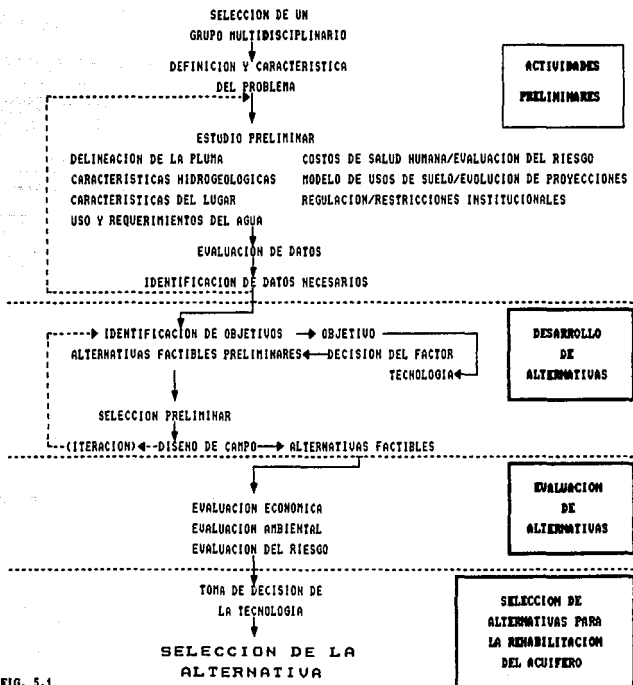


FIG. 5.1

Definición y caracterización del problema. El problema se define en dos términos: 1) problemas anticipados, que por lo general surgen de aquellas actividades altamente contaminantes y que amenazan a los suministros de aguas subterráneas. 2) problemas existentes donde una instalación o actividad con potencial amenazante es ya un hecho. Identificado el problema lo siguiente es conocer las características del problema relacionadas con la fuente, la cual puede ser puntual (pozos de desechos), areal (fertilizantes en agricultura), lineal (intrusión salina) o regional (incrementando el número de fosas sépticas en una región). El factor primordial ante un problema existente de contaminación es la urgencia a la necesidad de dar una solución inmediata a dicho problema, dependiendo de las características y duración del contaminante. Si el acuífero contaminado es una fuente de abastecimiento de agua potable, o el problema fué descubierto debido a una respuesta adversa de la salud pública, deberá ser necesaria tal solución inmediata.

Estudios preliminares. - Estos estudios nos permiten recabar mayor información, así como detallar más las características del problema. El detalle y duración del estudio preliminar habrá de determinarse por la urgencia del problema y sus recursos disponibles.

Las áreas de información pueden ser agrupadas como: información específica del problema (delimitación de la pluma contaminante y características hidrogeológicas), información específica del lugar (características del lugar, requerimientos y uso del agua y modelos del uso de la tierra), y otros (costos de salud, evaluación del riesgo

y restricciones institucionales).

Delimitación de la pluma. Es el paso en el cual se caracteriza la cantidad, naturaleza y extensión de la pluma y las fuentes de contaminación del agua subterránea. La información obtenida no sólo ayudará a determinar las estrategias de rehabilitación de acuíferos, sino que podrá también apoyar en la valoración de las posibilidades de un pre-tratamiento o recuperación económica. A continuación se describen algunas categorías de información de interés.

1.- Caracterización físico-química de los contaminantes.- Permite determinar el tratamiento tecnológico que se requerirá para remover el daño de una determinada área y también puede dar información de las posibilidades de recuperación económica del acuífero. Una caracterización físico-química de desperdicios puede dar una idea de los contaminantes a considerar.

2.- Información sobre el transporte y destino de los contaminantes.- Habiendo caracterizado los contaminantes es necesario obtener toda información sobre su transporte y destino a través del subsuelo, así como la información de la capacidad atenuante de los suelos sobre el contaminante. Es importante conocer el comportamiento del contaminante bajo diferentes condiciones de pH en el subsuelo dado que alguno de ellos puede precipitarse o solubilizarse si se presentan las condiciones adecuadas. El resultado final a considerar bajo este contexto debe ser la información que se obtenga sobre la habilidad del contaminante para internarse a través de la estructura del suelo y alcanzar el agua subterránea. Las medidas atenuantes y factibles a

establecer serán en función de esta habilidad.

3.- Toxicidad y riesgo de salud de los contaminantes.- Se debe obtener información sobre la toxicidad y los riesgos de salud del contaminante, no solo lo que consierne a la vida humana, sino que también a la flora y fauna. El uso final que se de al agua subterránea contaminada será función de su toxicidad y de los riesgos de salud. Por ejemplo, un acuífero que contenga altas concentraciones de metales pesados tendrá que abandonarse para otros usos, mientras que aquel que contenga altas concentraciones de nitrato podrá ser utilizado para el riego con un mínimo de tratamiento. Específicamente la información deberá obtenerse sobre la base de los niveles tóxicos del contaminante, quizá a partir de los niveles normales. También es aconsejable obtener información sobre los efecto colaterales de los niveles tóxicos, por ejemplo, ¿Causa malestar agudo temporalmente, es potencialmente carcinógeno; los efectos son de largo plazo o se amenaza la vida?

4.- Area de extensión, profundidad y cantidad de contaminante.- En la medida de lo posible, resulta necesario estimar el área de extensión, la profundidad y cantidad del contaminante en el subsuelo. EL objetivo es obtener una estimación de la magnitud del problema. La "medida" del problema corregido, en sí misma, puede limitar el número factible de soluciones. Idealmente, los datos del existente monitoreo de pozos, los diarios de pozos, etc.; deben utilizarse para estimar la magnitud del problema; sin embargo, esta información no es con frecuencia asequible. En la mayoría de los casos un cálculo educado de la magnitud del problema tendrá que hacerse considerando una extensa

gama de datos, tales como: el tipo de suelo, la topografía de la zona, el clima y la duración del problema.

Un paso importante para la delimitación de la pluma, es la identificación y caracterización de la fuente de contaminación. Tal fuente no siempre será fácil de identificarla, y si podría requerir extensas inspecciones de campo. Una vez que la fuente haya sido identificada, se habrá de obtener información específica. Estas categorías de información son como a continuación se detallan:

1.- Caracterización físico-química de la fuente.- Una completa caracterización físico-química de los desperdicios puede ser necesaria para predecir los contaminantes potenciales. Sin embargo, esta información también puede usarse con la intención de reducir el problema en la fuente.

2.- Variabilidad de los desechos.- La variabilidad de los desechos debe ser considerada, ya que la estrategia de control para un contaminante específico no se lleva a cabo con desperdicios altamente variables. Una fuente de desperdicios altamente variable podría incluir un basurero que acepte tanto desechos peligrosos como no peligrosos.

3.- Factor de tiempo.- Los datos en que ha permanecido la fuente de desechos puede dar una idea de la magnitud del problema. Específicamente, es conveniente conocer cuanto tiempo una cantidad dada de desperdicios ha estado en su lugar, o durante cuanto tiempo ha estado operando con cierta actividad.

4.- Prácticas previas de eliminación de desechos.- Es importante conocer la información histórica sobre las prácticas de eliminación de

desperdicios. ¿Fueron éstos indiscriminadamente depositados y cubiertos, o se formaron con ciertas precauciones? Las soluciones factibles para el problema de las lixiviaciones obtenidas por algún depósito abierto pueden diferir de aquellas que provengan de un relleno de basura con cubiertas impermeables.

Características Hidrogeológicas. El concepto incluye la caracterización del subsuelo donde el problema existe, la cual sirve para dos propósitos principales. Primero, una descripción de las características hidrogeológicas del lugar que permitan entender mejor la magnitud del problema. Segundo, a través de la investigación hidrogeológica se permitirá identificar y diseñar las estrategias potenciales de rehabilitación de un acuífero.

Algunas áreas de información necesarias y las razones de su interés son las siguientes:

1.- Composición geológica y perfil generalizado del suelo.- La determinación del tipo de suelo es importante para definir tanto la capacidad del contaminante para moverse a través del subsuelo y las medidas factibles de rehabilitación. Determinados suelos poseeran altas tendencias para atenuar a los contaminantes a través de la adsorción, precipitación, filtración, etc.; más que otros. Del mismo modo, algunos suelos serán sensibles a ciertas estrategias de restauración mientras que otros no.

2.- Características físico-químicas del suelo.- La caracterización física del tipo de suelo proveerá información sobre la habilidad de éste para filtrar el contaminante, como también dará idea

de la viabilidad del suelo para aplicar diferentes medidas de restauración. La caracterización química proveerá información sobre la habilidad del suelo para remover químicamente a un contaminante a través de la absorción, precipitación, etc.; en algunos casos la composición química del suelo será necesaria para determinar la factibilidad de la estrategia particular de la restauración, especialmente en tecnologías in-situ.

3.- Profundidad del agua subterránea y de roca.- La profundidad del agua subterránea, en conjunción con la caracterización físico-química del suelo dará idea de cuanto tiempo tomará un contaminante o contaminantes en alcanzar realmente al acuífero. Si la profundidad es suficiente para que el agua exista en un suelo altamente atenuante, puede esperarse entonces un mínimo de agua subterránea contaminada. La profundidad de roca es necesaria para evaluar la necesidad de algunas estrategias de contención del contaminante tales como paredes impermeables o láminas piloteadas.

4.- Modelos de flujo y volúmenes de aguas subterráneas.- Los modelos de flujo y volúmenes de agua subterránea que se ven amenazados jugaran un papel vital en la determinación de las soluciones factibles del problema. Obviamente, la dirección del flujo, marcará el lugar físico a seguir en cualquiera de las formas propuestas como medida de restauración. Similarmente, el volumen de agua afectado dictará el destino de las medidas potenciales de restauración.

5.- Gastos y áreas de recarga.- La identificación de los gastos y áreas de recarga jugaran un papel importante en los planes de protección del acuífero. El uso de medidas institucionales tales como

la zonificación para minimizar la amenaza de las actividades del agua subterránea, en las áreas de recarga del acuífero, es uno de tales planes.

6.- Características del Acuífero.- La identificación de las características del acuífero será esencial para cualquier análisis del flujo de agua subterránea y del transporte de contaminantes; esta información llega a ser extremadamente importante si se han iniciado estudios modelo del agua subterránea. Enlistadas en las tabla 5.1 están algunas de las características que necesariamente deben ser determinadas, tanto a través de datos existentes como de la conducción de estudios de campo.

7.- Existencia y procedimientos de monitoreo para la localización de pozos.- La identificación de la existencia de monitoreo en la localización de pozos y los parámetros monitoreados pueden ahorrar tiempo de estudio y costos. Además de proveer datos de inmediato, la existencia de monitoreo de pozos puede en algunos casos llegar a ser parte permanente de una red de monitoreo.

8.- Datos de la calidad del agua subterránea.- Los datos de calidad del agua subterránea son importantes para la determinación de la severidad del problema y de la toma de acciones apropiadas para corregirlo.

Tabla 5.1. - Características del acuífero (Referencia 9)

confinado- libre	conductividad hidráulica
isotrópico-anisotrópico	coeficiente de dispersión
homogéneo- no homogéneo	coeficiente de almacenamiento

Caracterización del lugar. Una descripción de las características generales del lugar, es también un hecho importante. Porque los atributos de la superficie del sitio afectarán directa o indirectamente al ambiente del subsuelo. Estos atributos necesitan ser identificados. Es necesario la información sobre los factores climáticos (precipitación, temperatura y evapotranspiración); los factores de localización (la topografía, la accesibilidad, el tamaño de la zona, la proximidad hacia el agua superficial y la proximidad hacia los centros de población). Los comentarios adicionales para cada uno de estos factores son los siguientes:

1) Precipitación.- La precipitación en la mayoría de los casos determinará tanto la cantidad como el gasto al que los contaminantes partirán del sitio al agua subterránea. Esto es particularmente cierto en la lixiviación de contaminantes a partir de desechos sólidos. La precipitación también afecta el gasto de recarga de un acuífero.

2) Temperatura.- La temperatura de la superficie llegará a ser un factor importante en la determinación de la factibilidad de ciertas estrategias en el tratamiento de superficie. Por ejemplo, se afectará

por la temperatura la transferencia de sustancias orgánicas a partir del agua subterránea en un área de operación

3) Evapotranspiración.- La cantidad de agua perdida hacia la atmósfera a través de la transpiración y evaporación pueden ser importantes cuando se considera el último uso de un sitio, por ejemplo, la superficie encapsulada de un basurero en parte sobre la evapotranspiración a partir de cubiertas vegetativas para reducir la cantidad de agua infiltrada hacia el desecho sólido.

4) Topografía.- La topografía general del lugar afectará el gasto de infiltración y las soluciones asequibles del problema. En áreas de gradientes excesivos, tendrán poca infiltración y serán sujetas de altos rangos de erosión. Esto podría ser importante en el momento de diseñar la superficie del sitio dispuesto.

5) Accesibilidad.- Está relacionada con la topografía en áreas de terreno accidentado o de accesolimitado presentarán no sólo problemas de construcción sino que también podrían obstaculizar cualquiera de las operaciones subsecuentes o a las actividades de mantenimiento.

6) Tamaño del lugar.- El tamaño del lugar se refiere a la extensión de la superficie actual del problema. Este concepto afectará las soluciones factibles en las que muchas de las tecnologías son medidas específicas, por ejemplo, remover el suelo no es probablemente lo más accesible desde el punto de vista económico para un sitio multiacre contaminado.

7) Proximidad del agua superficial.- Las localizaciones del agua superficial relativa al lugar son importantes por un gran número de razones. Primero, la solución para el problema del agua subterránea no

debería crear un problema de agua superficial. Además, los esquemas que incluyen el tratamiento de superficies pueden requerir de descargas de superficie. Un lugar para este tipo de descargas debe ser necesariamente determinado. Segundo, el agua puede jugar un papel importante en la construcción de pozos de lechada y/o la operación y mantenimiento, revegetación del lugar. Una fuente acuifera puede ser vital para el éxito de un esquema de restauración.

8) Proximidad a los centros de población.- La ubicación de la cercanía de los centros de población relativa al lugar ayudará a determinar la magnitud del problema como sus posibles soluciones. Si el sitio esta localizado cerca de un centro de población grande, el problema puede ser más urgente que otro localizado en una área relativamente aislada.

Uso de agua y sus requerimientos. - La determinación del uso de agua subterránea y los futuros requerimientos en el área de estudio ayudarán a determinar la amenaza crítica o contaminación del recurso hidráulico. Las categorías de información necesarias y las razones de su importancia son como sigue:

1) Uso actual.- Se debe obtener la información sobre la cantidad de agua utilizada para fines domésticos, de agricultura y de propósitos industriales. Además, esta información se debe dividir en aquellos usos abastecidos por agua de superficie y agua subterránea.

2) Uso futuro.- Se debe obtener una estimación de los requerimientos de agua en el futuro para usos domésticos, agrícolas y propósitos industriales. Aquellas áreas que anticipen desarrollos a

gran escala, acompañadas por grandes demandas de agua, pueden necesitar eliminar problemas de aguas subterráneas e instituir medidas de protección acuífera (Medidas institucionales).

3) Estandares de calidad para el uso actual y futuro del agua.- Los estandares del uso de agua subterránea actual y futuro pueden jugar un papel importante en la determinación de estrategias factibles de restauración del acuífero. Más específicamente, el uso de estandares para el beneficio pueden dictaminar el grado de tratamiento que deberá de recibir el agua subterránea contaminada antes de su uso subsecuente.

4) Costos.- Así mismo, es necesario una estima de los costos actuales del suministro de agua, específicamente los costos para obtener el agua subterránea a partir del acuífero bajo estudio. Los costos asociados a los cambios en las fuentes de suministro podrían también ser estimados, si el cambio hacia una fuente diferente de suministro de agua llega a ser prohibitivamente caro, puede ser necesario considerar algunos esquemas de tratamiento más elaborado para restaurar el acuífero.

Evaluación de riesgos y costos de salud.- Teniendo identificada la toxicidad y riesgos de salud de un contaminante durante su descripción es necesario una evaluación para dar por hecho el potencial actual de los impactos en la salud humana. Este esquema es esencial en la evaluación de la alternativa para tomar acciones sobre la restauración de un acuífero. La información necesaria es:

1) Problemas potenciales de salud.- La información sobre los

problemas de salud debidos por el contaminante considerado, deben obtenerse a partir de la delineación de la pluma. Específicamente, la información necesaria es saber si el contaminante es tóxico, carcinogéno o amenaza la salud de la población en general.

2) Evaluación de riesgos.- Es recomendable una evaluación de riesgos para evitar enfermedades. Obviamente, si con cierto acuífero se atenta la salud, o el riesgo de alterar sus niveles normales de calidad es alto. Aquí la pregunta de interés sería ¿Cuáles son los riesgos de utilizar un contaminante potencial aún no aceptable (de acuerdo con los estandares de calidad general o propios)? Idealmente, sería conveniente tener información cuantitativa del número de frecuencia de incidentes de salud a presentarse. Una solución más factible debería asignarse a la probabilidad subjetiva de la ocurrencia para diferentes niveles de contaminación.

Uso de los modelos de suelo y las proyecciones agrícolas.- El objetivo de la información bajo estos conceptos, es el de asegurar que potencial de estrategias de restauración no llegan a ser útiles en la práctica. Específicamente, no sería prudente gastar millones de dolares en el desahogo de un problema en particular que sólo es uno de muchos en la actualidad o que es potencialmente contaminante en un acuífero La información de utilidad bajo estas consideraciones incluye el uso presente y futuro de los modelos agrícolas y su actividad en el área de estudio. Son ejemplos, de ésta necesaria información los siguientes:

1) Uso de modelos agrícolas comunes: una determinación de la

existencia del uso de modelos de los suelos, dará una idea considerable del tipo y grado del tratamiento que habrá de darse a un problema en particular. Un sistema de renovación y tratamiento de áreas altamente industrializadas, podría conducir a uno de los grupos de eliminación, y tratamiento o pago por una contaminación que se causó.

2) Proyecciones agrícolas.- Es esencial una proyección de las actividades agrícolas que posean potencial para contaminar el agua. Si cierta formación de agua para uso agrícola ha sido degradada en su calidad y las proyecciones para el futuro agrícola incluyen el incremento de actividades en el área, el contaminante más que ser eliminado resulta conveniente.- En la tabla 5.2 se enlistan algunas de las actividades inmediatas más amenazantes que deben ser investigadas.

Tabla 5.2.- Ejemplos de Actividades amenazantes del agua subterránea. (Referencia 9)

Basureros industriales
Basureros municipales
Fosas sépticas
Extracción de minerales, producción petrolífera
Sustancias químicas en la agricultura

Evaluación de datos.- Un aspecto crítico en la recolección de la información será la evaluación de la calidad de la información recolectada. Kasehck y Nadeau (1982) enlistan tres problemas de interés para reunir la información una vez dispuesta: 1) ¿Qué tan

buenos son los datos de hoy?; 2) ¿Podría ser una solución ingenieril convenientemente desarrollada y diseñada?; 3) ¿Podrían ser lo datos defendidos en la corte?. Considerando el tiempo, el muestreo y los análisis de la información, se puede cuidar la secuencia de la información que nos permite definir si es precisa y/o útil.

Datos necesarios. - Teniendo completa la recolección y la evaluación de la información viable, el siguiente paso es la identificación donde la información no fué exitosa. Kaschak y Nadeau (1982) identifican como el paso más difícil para definir que información es necesaria para evaluar la estrategia de rehabilitación sin "el estudio de áreas muertas". La falta de información debería ser identificada y categorizada.

5.1.2.- DESARROLLO DE ALTERNATIVAS

El proceso de alternativas para la restauración de acuíferos se muestra en la FIG. 5.2.

Este proceso incluye cuatro objetivos diferentes : prevención, abatimiento, limpieza y restauración. Prevención, como su nombre lo indica, son medidas que no permiten la ocurrencia de la contaminación. El contexto de prevención será tomar las medidas de "no permitir que los contaminantes alcancen al agua subterránea". El abatimiento de la contaminación en el agua subterránea incluirá la suspensión de contaminantes móviles en el agua, y la obstrucción del movimiento del

DESARROLLO DE ALTERNATIVAS

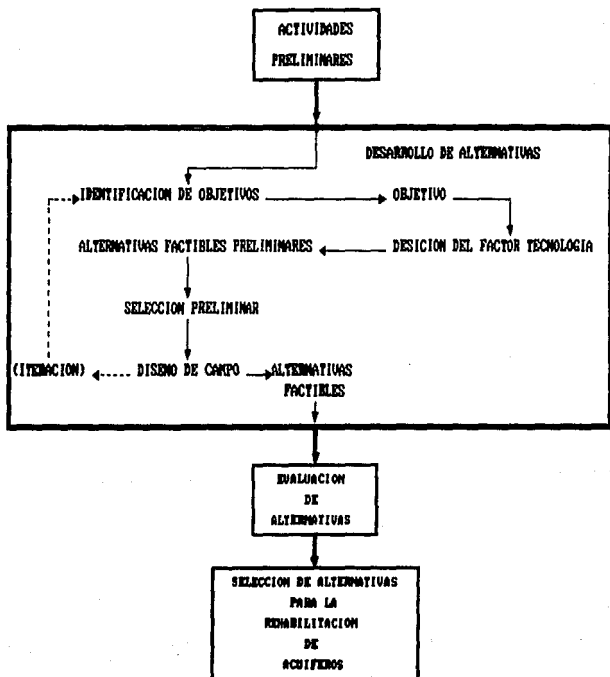


FIG. 5.2

contaminante habiendo ya alcanzado al agua subterránea. La limpieza se refiere a la eliminación del contaminante, como la extracción y tratamiento del agua o la inmovilización en el sitio. La restauración incluíra aquellas medidas que prueben que el acuífero puede regresar a su estado "original". Muchas veces estas incluyen estratégicamente una limpieza, más la recarga de agua fresca o tratada. De aquí el hecho de que las alternativas no son independientes, más específicamente, una limpieza en verdad efectiva puede también incluir los pasos "prevención" y "abatimiento"; la tabla 5.3 contiene una lista de varias estrategias útiles para la obtención de varios objetivos.

Tabla 5.3.- Estrategias potenciales de rehabilitación para problemas crónicos de contaminación. (Referencia 9)

Objetivo	Tipo de estrategia	Acción
Prevención	Control de la fuente contaminante	1.- Reducción o remoción de la fuente contaminante. 2.-Selección óptima del sitio. 3.-Control opcional hecho por el hombre: a)Capas impermeables b)Materiales impermeables c)Cubrimiento de superficies d)Drenajes colectores e)Zanjas interceptoras
Abatimiento	Manejo de desechos	1.-Modificación del bombeo 2.-Pozos de remoción 3.-Levantamiento de presión 4.-Barreras subsuperficiales
Limpieza	Tratamiento y depósito de desechos	1.-Tratamiento superficial 2.-Metodos In-situ
Rehabilitación	Limpieza más recarga	

Identificación de objetivos.- La tabla 5.4 muestra la identificación de objetivos con algunos factores de decisión y condiciones. La revisión de factores limitantes para cualquiera de los posibles fines habilitaran una identificación más rápida y factible.

Decisión del factor tecnología.- Teniendo establecido un objetivo preliminar para una necesidad debidamente identificada, el siguiente paso es seleccionar la tecnología adecuada (tabla 5.5). La tecnología que puede considerarse para la ejecución se presenta en las primeras dos columnas. Después de identificar la tecnología factible, se muestran los factores y condiciones para cada tecnología en las columnas restantes. Al final el resultado podrá ser una serie de tecnologías o combinación de tecnologías que son aplicables para tal efecto.

Selección preliminar.- Teniendo desarrollada una lista de tecnologías factibles (alternativas), es recomendable realizar un proceso de selección preliminar, a continuación se listan algunos factores que pueden ser considerados para tal efecto:

- 1) Técnica factible. Se debe considerar la factibilidad técnica de todas las alternativas. Algunas tecnologías han sido ampliamente usadas y sus éxitos documentados; otros están todavía en etapa de desarrollo, o al menos su aplicación al control de la contaminación del agua subterránea ha sido limitado. Otra consideración será la capacidad técnica de las personas que operan la tecnología propuesta. Algunas tecnologías su diseño es complejo y requieren monitoreo y

Tabla 5.4.- Identificación de objetivos

OBJETIVOS	SITUACION TEMPORAL	COSTOS GLOBALES	REQUERIMIENTOS PARA EL USO DEL AGUA	CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS
Restauración	La restauración es posible al considerar la existencia de problemas.	Los esquemas de restauración son estrategias de control más costosas, sin embargo podría tener beneficios adicionales regresando el acuífero a usos beneficios.	La restauración podría ser la meta primaria si el comercio con el agua subterránea que es o debe ser la fuente principal de suministro de agua para una área determinada.	La restauración es el método más accesible para la superficie, acuíferos libres originalmente de agua de alta calidad.
Limpieza	La limpieza es un hecho cuando se consideran problemas existentes.	Las estrategias de limpieza son costosas. Algunas veces el acuífero puede ser restaurado para usos beneficios y posibilidad de una recuperación económica a partir de ciertos contaminantes.	La limpieza se considera cuando el agua subterránea se utilize con fines agrícolas o industriales.	Las medidas de limpieza más factibles para fuentes de aguas subterráneas someras, pero pueden hacerse algunas aplicaciones a profundidades, a fuentes confinadas por remoción y tratamiento.
Abatimiento	El abatimiento puede ser considerado cuando se tratan problemas existentes y se les pueda incluir también como mecanismo de salvaguardado para un futuro o anticipar problemas.	Rangos de estrategias de abatimiento desde las moderadas hasta las muy costosas, con pequeña oportunidad para la recuperación económica.	Medidas de disminución que son comúnmente empleadas para salvar las porciones no contaminadas de un acuífero, en tanto mientras se considera la porción contaminada como pérdida.	Las medidas de abatimiento que son las más aplicables para las fuentes poco profundas con suspensión, siendo más aplicable la medida de abatimiento para las fuentes profundas.
Prevención	Las medidas preventivas son aplicables solo para lograr mayores actividades en el futuro o para anticipar problemas venideros.	El alcance de las estrategias preventivas por bajos costos o moderados dan poca oportunidad para la recuperación económica	Las medidas de prevención podrían ser aplicadas para proteger cualquiera de los procesos comúnmente utilizados o para fuentes de agua subterránea potencialmente utilizables.	No hay restricciones

Tabla 5.4 Identificación de objetivos

OBJETIVOS	EXTENSION AREAL	RIESGOS DE SALUD HUMANA	MODELOS DEL USO DE SUELOS
Restauración	El tamaño areal incrementa el problema, la atracción de los esquemas de restauración decrece debido al incremento de los costos. Los problemas regionales serán probablemente más tratables con medidas de abatimiento.	Si la salud humana está en alto riesgo, la restauración y la limpieza deben darse con prioridad si son técnicamente factibles. Si no lo es, se abandona y se desarrolla una nueva fuente.	Las medidas de restauración y de limpieza no deberán tener alta prioridad en áreas que tienden a ser de agua de dudosa calidad, tal como las áreas dispuestas para los desperdicios industriales.
Limpieza	Las medidas de limpieza no son económicamente atractivas a pequeña escala, ni para problemas a gran escala.	Ver arriba	Ver arriba
Abatimiento	Las medidas de abatimiento ha ser empleadas son de tamaño específico y cubren la totalidad del rango desde los más pequeños, problemas localizados, como grandes problemas regionales	Para riesgos de salud bajos a moderados las medidas de abatimiento pueden ser empleadas además para prevenir la degradación del acuífero.	Las medidas de abatimiento son las alternativas más atractivas para el control de la contaminación de aguas subterráneas, en áreas sujetas a amenazas continuas si alguna de estas se presenta.
Prevención	Las medidas de prevención físicas son de tamaño específico. Algunas medidas institucionales son aplicables sobre un nivel regional.	No hay restricciones	No hay restricciones

Tabla 5.5.- Decisión del factor tecnología

TECNOLOGIA	ESTRATEGIAS DE CONTROL Y TECNOLOGIAS COMPLEMENTARIAS	SITUACION TEMPORAL	TIPO DE CONTAMINANTE	AREA DE EXTENSION
Medidas institucionales	La implementación de medidas institucionales serán probablemente las más favorables para la prevención de la contaminación de aguas subterráneas pero podría también ser utilizada como medida de disminución o abatimiento.	La aplicabilidad que se da para los problemas existentes es probablemente mínima excepto para los casos en que se ordena suspender una actividad dada. La máxima aplicación se destina para la preservación de la calidad del agua subterránea más común utilizada.		
Estrategia de control de las fuentes contaminantes	Las medidas de control de las fuentes son más aplicables como medidas preventivas, sin embargo esta son frecuentemente incorporadas como parte del total de las medidas de limpieza en sitios no controlados.	Las estrategias de control de las fuentes son aplicables a problemas existentes y podrían ser incluidas en el diseño de todas la instalaciones de depósito.	No hay restricciones	No hay restricciones
Sistemas de pozos	Los sistemas de pozos son aplicables a todas las estrategias de control incluyendo las de restauración. Los sistemas de pozos en algunos casos requieren tecnologías complementarias, comúnmente se utiliza el tratamiento en superficie y descarga.	Los sistemas de pozos pueden ser aplicables tanto para problemas existentes como para aquellos problemas que se puedan anticipar y tienen que ser utilizados para el control de emergencia en ciertos casos.--	Los sistemas de pozos son aplicables a contaminantes que fluyan con o sobre el agua subterránea.	Los sistemas de pozos son los menos factibles económicamente para pequeñas fuentes localizadas de contaminación, recíprocamente, para grandes fuentes de contaminación los sistemas de pozos pueden llegar a ser no económico por lo que necesariamente extraen tanto el agua contaminada como la no contaminada.
Sistemas interceptores	Los sistemas interceptores pueden ser empleados para la limpieza, abatimiento o prevención de la contaminación del agua subterránea. Sin embargo en todos los casos requiere de tecnología complementaria, comúnmente de tratamiento en superficie y descarga.	Cuando se trata de problemas existentes, los sistemas interceptores tomarán la forma de zanjadas interceptoras, mientras que los problemas anticipados comúnmente se previene empleando sistemas de drenajes colectores. Hay alguna aplicabilidad de las zanjadas interceptoras en derrames que incluyen flotación de hidrocarburos.	Los sistemas interceptores son aplicables a contaminantes que fluyan con o sobre el agua subterránea.	Los sistemas interceptores son factibles a pequeña escala así como en las fuentes de contaminación.

Tabla 5.5.- Decisión del factor tecnología

TECNOLOGIA	ESTRATEGIAS DE CONTROL Y TECNOLOGIAS COMPLEMENTARIAS	SITUACION TEMPORAL	TIPO DE CONTAMINANTE	AREA DE EXTENSION
Materiales impermeables (liners)	Los materiales son colocados sobre los sitios previos a la iniciación de una cada actividad, por lo que resultan más aplicables como esquemas preventivos. Los materiales por sí mismos no son totalmente efectivos y son comúnmente utilizados en conjunción con el control de la fuente o con sistemas de bajo drenaje.	La aplicación de los liners en problemas existentes está limitada en cuanto a que normalmente incluye remoción de los desechos o contaminantes sólidos.	Algunos liners asfálticos o suelos tratados llegan a ser más permeables a la exposición de lechadas. Algunos liners sintéticos muestran una resistencia pobre a los hidrocarburos.	No hay restricciones
Láminas piloteadas	Las láminas piloteadas siguen los atributos de las cementaciones y de los sistemas de lechadas en que sus más prácticas aplicaciones será para el abatimiento y prevención de la contaminación del agua subterránea. Sin embargo, el número de casos en los cuales las láminas piloteadas será la mejor técnica es mínimo	Las láminas piloteadas es similar a la cementación. Probablemente la mayor situación aplicable será el caso de tomar medidas de emergencia para contener derrames.	Las láminas piloteadas son generalmente resistentes a la corrosión.	Como el tamaño de un proyecto incrementa, las láminas piloteadas llegan a ser antieconómicas debido a los altos costos de material y del piloto de las láminas.
Cementación	La cementación es similar a los sistemas de lechada en que frecuentemente se requieren tecnologías complementarias para llevar a cabo entonces la restauración o la limpieza. La cementación puede ser aplicada individualmente como una medida de abatimiento.	Es también versátil en la que esta puede tener aplicación amplia tanto para problemas de contaminación existentes o anticipados. En suma la cementación está siendo promovido como un procedimiento para contener derrames.	Los cementaciones que contienen arcilla bentonítica son sujetas a limitaciones similares a aquellas que ocurren para los sistemas de lechada. Adicionalmente, las cementaciones químicas no son exitosas en ambientes altamente ácidos o alcalinos	Los costos de sistemas de cementación son altos, por lo tanto estos deberían ser aplicados para casos pequeños no ligados de contaminación.

Tabla 5.5.- Decisión del factor tecnología

TECNOLOGIA	ESTRATEGIAS DE CONTROL Y TECNOLOGIAS COMPLEMENTARIAS	SITUACION TEMPORAL	TIPO DE CONTAMINANTE	AREA DE EXTENSION
Parades impermeables	Las paredes impermeables pueden ser sobre todo parte de la restauración de los esquemas de limpieza. Pueden aplicarse como medidas de abatimiento, sin embargo algunas clases de sistemas que remueven el agua subterránea son comúnmente utilizadas. Las paredes impermeables son también aplicadas de manera individual como medida de prevención.	Las paredes impermeables son muy versátiles y pueden ser aplicadas en los problemas existentes como medidas de abatimiento o pueden ser incorporadas en el diseño para prevenir la contaminación de aguas subterráneas. Estas pueden ser utilizadas en situaciones de emergencia como los derramamientos.	Las paredes impermeables son sensibles a contaminantes específicos especialmente para aquellos de fuerza iónica intensa.	Los sistemas de paredes impermeables son más aplicables a problemas graves. Llegan a ser más económicos en tanto el radio de la longitud de fondo se incrementa.
Tratamiento en superficie	Las tecnologías para el tratamiento en la superficie pueden ser utilizadas en sistemas diseñados para prevenir, limpiar o restaurar acuíferos contaminados. Requieren alguna clase de sistema que remueva los contaminantes.	El tratamiento en la superficie puede ser utilizado para casos agudos y crónicos de contaminación de aguas subterráneas. Puede ser utilizado en sitios donde exista contaminación y también en aquellos donde se anticipa tal problema como medida de prevención.	No hay restricciones	El tratamiento en superficie tiene limitaciones para sitios de tamaño pequeños como para sitios grandes. Puede laborarse para fuentes pequeñas aun no económicas como para áreas extremadamente grandes.
Tratamiento In Situ	La tecnología de tratamiento In Situ puede ser utilizada con sistemas diseñados para abatir, limpiar o restaurar acuíferos contaminados. Siempre requerirá de alguna clase de sistema de inyección de nutrientes / químicos.	La tecnología In Situ puede ser aplicada para casos agudos o crónicos de la existencia de la contaminación. Para el tratamiento de problemas anticipados no es posible.	El tratamiento In Situ es específicamente para el contaminante. Los métodos biológicos son aplicados principalmente a los orgánicos, y los métodos químicos son aplicados a los compuestos inorgánicos.	Lo mismo para el tratamiento en superficie

TECNOLOGIA	SUELOS	CARACTERISTICAS DEL ACUIFERO	CARACTERISTICAS DEL LUGAR	REGLAMENTACIONES
Láminas piloteadas	Manejar el piloteo requiere de un suelo relativamente uniforme, suelto y libre de canto para una fácil construcción.	El piloteo de láminas estará limitado a los acuíferos superficiales (menores a 100 pie).	Similar a los sistemas de cementación excepto que la operación no conlleva cantidades intensivas de agua.	
Cementación	La cementación está limitada a tipos de suelos granulares que tienen una medida de porosidad lo suficientemente grande para aceptar fluidos de lechada bajo presiones aun pequeñas pero suficientes para prevenir la migración de un contaminante significativo, antes de la implementación. La cementación en el perfil del suelo altamente formado de capas puede terminar en la formación incompleta de la cuartería de cementación.	La presencia de altos niveles de agua y el flujo rápido del agua subterránea limita la cementación, debido a la dilución de las lechadas y al rápido transporte de los contaminantes.	Similar a las paredes impermeables.	Algunos procedimientos de cementación y algunos de tipo químico son propios y pueden ser controlados bajo programa de inyección subterránea.
Paredes impermeables	Los sistemas de lechada son aplicables a la mayoría de los tipos de suelos, sin embargo, en suelos tales como arena o grava ahí pueden ser significativas las pérdidas de lechada las cuales pueden hacer al sistema antieconómico.	Los sistemas de lechada son generalmente aplicables a los acuíferos pocos profundos (menores a 100 pie).	Sitios generalmente accesibles, moderada topografía y disponibilidad de agua son los más aconsejables.	Algunos procedimientos de construcción están patentados y requieren de licencia.
Tratamiento en superficie	No hay restricciones	No hay restricciones	El tratamiento en superficie en el sitio considerado requerirá de fácil accesibilidad que pueda adecuarse al manejo del equipo de construcción. Las instalaciones de tratamiento en superficie ocupara solo un espacio limitado, pero permanecera accesible para la actividad de monitoreo.	
Tratamiento In Situ	Es la tecnología probablemente mas aplicable a suelos permeables, los cuales aceptan a inyección de materiales.	Los acuíferos someros son probablemente los más aconsejables	Lo mismo para los sistemas de pozos	

TECNOLOGIA	SUELOS	CARACTERISTICAS DEL ACUIFERO	CARACTERISTICAS DEL LUGAR	REGLAMENTACIONES
Control de las fuentes	No hay restricciones	No hay restricciones	Va que la mayoría de la estrategia de control de las fuentes incluirán actividades de superficie, es sitio deberw ser de fácil acceso.	
Sistemas de pozos	Los sistemas de pozos requieren que transman rápidamente el agua subterránea y los contaminantes asociados.	Los sistemas de pozos son tratables - para la mayoría de los tipos de acuíferos, si n embargo estos no son ideales para acuíferos extremadamente poco profundos (5M).	Los sitios deberán ser accesibles para el equipo de perforación. Los sistemas de pozos requieren de monitoreo y de una fuente receptora para su descarga. Si el agua requiere tratamiento el sitio deberá ser accesible a o proximo a las instalaciones de tratamiento en superficie.	
Sistemas interceptores	Los sistemas interceptores requieren soltura total, suelos permeables que transman rápidamente el agua subterránea y contaminantes asociados.	Las áreas con altos niveles freáticos o suelos altamente impermeables o con capas de roca son deseables.	Porque el agua colectada necesita ser renovada, traída y descargada, el sitio deberá de ser de fácil acceso.	
Control de agua superficial	Las medidas del control del agua superficial son aplicables a cualquier tipo de suelo, el recubrimiento de la superficie llega a ser antieconómico cuando existen arcillas nativas fácilmente disponibles.	No hay restricciones	La regraduación para maximizar la escorrenteria es un importante aspecto. De aquí que, áreas de extremo relieve topográfico deban probablemente ser consideradas las menos aconsejables.	
Materiales impermeables (Liners)	Los suplos no limitan la aplicación de los liners, excepto cuando la arcillas nativas se utilizan como liners. En este caso los suelos deberán ser lo suficientemente impermeables y lo suficientemente densos.	Altos niveles freáticos pueden limitar el uso de los liners así como el que puedan causar que el sistema "flote".	El lugar deberá ser accesible a cierta variedad de vehículos de construcción incluyendo máquinas especiales instaladoras de liners.	

mantenimiento extensivo para la operación exitosa . Si el personal no estuviera adiestrado para manejar tales responsabilidades, tal vez sería recomendable considerar un sistema más factible.

2) Aceptación pública.- Un aspecto importante para un proyecto de restauración de acuíferos es que debe ser aceptado por el público. Si la solución presentara una superficie mal vista para el público o una operación de altos requerimientos técnicos, esto pudiese ser dificultoso para que el público en general lo acepte.

3) Restricciones físicas.- Algunas de las alternativas potenciales podrían ser eliminadas por restricciones físicas obvias, por ejemplo, la fijación de barreras impermeables podrían no ser factible en un área densamente poblada.

Diseño de campo.- Probablemente la mejor manera de eliminar las posibles pero no factibles alternativas podrían ser a través del uso del diseño de campo, siendo éste un análisis a pequeña escala de las alternativas propuestas para estimaciones preliminares de tamaño, costo, expectativa de vida, eficiencia, etc.. El diseño de campo puede descansar en estimaciones de costo, *es* otro factor para generar una aproximación para cada una de las alternativas potenciales. El diseño de campo deberá ser económico, consumir menor tiempo e inherentemente menos preciso que un estudio hidrogeológico completo. El objetivo del diseño de campo es el de eliminar las alternativas más costosas o de un análisis del subsuelo muy extenso.

Iteración.- Con la selección preliminar y los datos de costo del diseño de campo, sería apropiado una iteración a través del procedimiento bosquejado anteriormente. Tal vez, con los datos generados, podrían indicar que todas las alternativas posibles exceden los recursos disponibles. En este caso podría ser necesario redefinir los objetivos de la estrategia del manejo de las aguas subterráneas, e intentar desarrollar nuevas tecnologías posibles para alcanzar nuevos objetivos modificados. El propósito de la iteración es, además, restringir la lista de alternativas potenciales a esas que son económicamente y técnicamente factibles.

5.1.3.- EVALUACION Y SELECCION DE ALTERNATIVAS Y DE ESTRATEGIAS DE RESTAURACION DEL ACUIFERO

La selección de una sola alternativa de la lista de alternativas factibles proviene de la consideración equilibrada de factores técnicos, económicos y ambientales. Un criterio frecuentemente y gradualmente citado es "la acción más económica que reduce riesgos a un nivel aceptable, puede considerarse como la más efectiva" (St. Clari, Mc Closkeg and Sheiman 1982). Esta afirmación plantea un número de preguntas, tales como:

- 1) ¿Cuál es un nivel aceptable?
- 2) ¿Aceptable a quién?
- 3) ¿Es el de mayor costo el óptimo?
- 4) ¿Son los costos y los riesgos igualmente importantes?
- 5) ¿Son los mismos niveles y calculos para el costo y riesgo?

Consideraciones económicas.- Es difícil realizar afirmaciones generales concernientes a los costos de la restauración de acuíferos. Una afirmación ampliamente aceptada del costo de limpieza de un acuífero contaminado, es que éste es extremadamente costoso, esto es cierto para muchos, pero no para todos los casos. Lo costoso puede considerarse relativo y no todas las actividades de remediación de aguas subterráneas están diseñadas a la limpieza como última finalidad. Las dificultades aparecen en cualquier intento de cuantificar o recopilar la información sobre los costos de la rehabilitación de acuíferos.

El costo de una actividad de restauración de aguas subterráneas es segundo en importancia, sólo en lo que concierne a la salud pública. Existen las tecnologías para limpieza del agua subterránea contaminada, pero pueden no ser económicas. En un estudio reciente, Neely (1981) encontró que el costo es el principal determinante del tipo de tecnología de restauración empleado en lugares de desechos peligrosos no controlados, ya que la elaboración de esquemas de limpieza resulta costoso, las compañías pueden haber optado por medidas de prevención y abatimiento menos costosas pero ambientalmente más amenazantes. Cualquier actividad de limpieza del agua subterránea requerirá recursos para estudios ingenieriles y factibilidad, construcción, operación y mantenimiento, y otros costos. Cualquiera de estas áreas puede llegar a ser un factor de mayor costo. Por ejemplo, Roux y asociados recientemente comenzó un estudio de un millón de dolares justo para desarrollar una lista de recomendaciones para acciones de restauraciones en lugares de desechos tóxicos en

Masachuset. En contraste Kaufman (1982) ha mostrado que los costos de operación son el componente de mayor costo de un sistema de limpieza de carbón activado granular. Tolman (1978) realizó un resumen de costos estimados y características de métodos de restauración para un lugar de relleno hipotético de un solo tamaño (10 acres) el resumen se presenta en la tabla 5.6. Adicionalmente; pueden hacerse algunos comentarios cualitativos concernientes a alguna tecnología enlistada en la tabla 5.6. Primero las tecnologías de control de agua superficial son solamente usadas como preventivas y/o medidas de abatimiento cuando se trata de la contaminación de aguas subterráneas. Por lo tanto, estas operaciones exigen una tecnología complementaria para limpiar un acuífero. De las cuatro tecnologías de control de aguas subterráneas enlistadas en la tabla 5.6, una zanja de lechada de bentonita debe ser considerada la de mayor costo efectivo. La construcción de paredes impermeables es lenta, de labor intensiva y costosa y como tal este proceso es probablemente económicamente sólo en pequeños casos localizados de contaminación, las estrategias de manejo de la pluma, se enlistan en la tabla 5.6, incurrirán en largas operaciones y costos de mantenimiento. Estos costos estan asociados a la fuerza de trabajo para dirigir operaciones, suministro de potencia para bombas y posiblemente al mantenimiento acelerado debido a la naturaleza de los contaminantes que estan siendo bombeados (Glover,1982); también el manejo de sistemas pasivos (drenajes, zanjas interceptoras) generalmente tienen bajos costos de operación que los sistemas activos (bombeo).

Evaluación económica.- La evaluación económica de alternativas

factibles puede seguir el tradicional procedimiento, detallando todos los costos para un proyecto, amortizando estos costos para la vida del proyecto, desarrollando medidas de los beneficios del proyecto, y comparando estos datos para cada una de las alternativas un número único de concerniente aparece cuando se considera una evaluación económica de los problemas del agua subterránea

El primer aspecto concerniente, es asociado con la comparación de alternativas sobre bases comunes. Las alternativas pueden ser proyectadas para llevar a cabo algunos resultados a través de métodos radicalmente diferentes. Problemas relevantes bajo este encabezado son los siguientes:

1.- El primer programa es el nivel de tratamiento o la eficiencia del sistema, una alternativa podría reducir la concentración del contaminante por partes por billón, otras a partes por millón.

2.- Algunas alternativas pueden ser de operación y mantenimiento intensivo, otras proveen la misma solución con menos intensidad. La comparación de estos tipos de alternativas es dificultoso debido al constante cambio de intereses proporcionados.

3.- Las alternativas proveen soluciones similares pero podrían tener radicalmente diferente estructura de tiempo o vida esperativa. Todos los proyectos pueden ser comparados.

Tabla 5.6.- Sumario de costos estimados y características de los métodos de rehabilitación. (Referencia 9)

Método	Promedio de Costos Estimados (\$ en miles) ^a	Características/observaciones
<u>Control de agua superficial</u>		
Perfil inclinado	184	Incrementos del escurrimiento, reducción de la infiltración
Desviación del agua superficial	20	Desviar agua superficial de rellenos
Sellado de la superficie con arcilla	234	Si la arcilla está disponible localmente es un medio económico de retardar la infiltración
Cemento Bituminoso 4-13 cm (1.5-5 pg)	315	Puede eliminar la infiltración
Cubierta de ceniza	235	Puede ser disponible libremente
PVC, 30 mil	482	Muy impermeable; sello costoso; es necesariamente una previa preparación cuidadosa
Campo drenado	65	Transporta el agua infiltrada fuera del sello incrementando la efectividad del mismo.
Revegetación inclinación < 12%	10	Estabiliza el material de la cubierta; temporalmente incrementando la transpiración; provee beneficios estéticos
inclinación > 12%	19	
<u>Control de agua subterránea</u>		
Zanjas de Lechada de Bentonita	670	Método de simple construcción; retarda el flujo del agua subterránea
Cortinas Cementadas	1400	Muy efectivo en sólidos permeables
Láminas Piloteadas	800	Ampliamente usado para la costa

Método	Promedio de COSTOS Estimados (\$ en miles) ^a	Características/observaciones
Sellado inferior	4000	Puede ser necesario la recolección de lexiado, acción como de línea, dificulta la perforación a través de desechos.
<u>Manejo de la Pluma^b</u>		
Drenaje	23	Efectivo en niveles de agua bajos a pocos metros en materiales no consolidados; puede ser utilizado para recolectar muestras de lexiados
Pozos Puntuales	185	Succión límite de profundidad a 7 - 9 m (20 - 30 pies); instalación no muy costosa; utiliza solamente una bomba; puede utilizarse par recolectar muestras de lexiados.
Pozos Profundos	183	Utilizado a profundidades bajas de niveles de agua; necesita de una bomba por pozo; altos costos de mantenimiento.
Barreras Inyección/Extracción		Crea una barrera hidráulica para detener el movimiento del lexiado; los costos de operación y mantenimiento son altos.
<u>Inmovilización Química</u>		
Fijación Química de Cubiertas	145	Utilización de sedimentos fijados químicamente para proveer un sello superior; provee medios de depósito para sedimentos; ayuda a la estabilización de basureros.

Método	Promedio de Costos Estimados (\$ en miles) ^a	Características/observaciones
Inyección Química	86	Inmoviliza a un solo contaminante; en la mayoría de los casos no es factible.

Excavación y Relleno

Excavación y Relleno	4570	Método muy costoso; de difícil construcción.
----------------------	------	--

^a Costos para un basurero hipotético de 4 Ha (10 acres), Estimaciones altas y bajas donde se promediaron para determinar estos costos.

^b Costos incluidos en el presente trabajo de 20 años, operación y mantenimiento y donde es aplicable, potencial para un basurero de 4 Ha (10 acres).

El segundo aspecto en importancia, es el costo de elementos específicos asociados con las alternativas. Es importante que todo el costo de los elementos sea identificado. Como un ejemplo de cuanto extensiva puede ser esta lista. La tabla 5.7 resume los costos de componentes para un sistema de pozos(Lundy y Mahan, 1982). Bixler, Hanson y Langner (1982) notaron que los costos de los elementos pueden ser monetarios y no monetarios, directos o indirectos. En adición a los costos monetarios directos tales como materiales, equipo, etc. y los costos no monetarios deben ser incluidos tales como el costo de relocalización, pérdida de ingresos, decremento de valores de propiedad y otros. Es importante que la lista de costo-elemento sea completada e incluir todos los costos pertinentes.

Otra importancia asociada con la evaluación económica de alternativas, es el desarrollo de una medida de beneficio. Algunos beneficios serán muy difíciles para asignarle valor en dolares; por ejemplo, reducir los riesgos de salud. Adicionalmente, algunos beneficios pueden ser difíciles para cuantificar, mucho menos asignar un valor monetario.

Tabla 5.7.- Componentes de costos de los sistemas de pozos
(Referencia 9)

Componente del Costo	Elementos del Costo	Factor Principal Afectando al Costo
Delineación de la Pluma (k)	Sólidos Perforados Pozos de Monitoreo Análisis de Datos Análisis de Laboratorio Reportes	Area y profundidad de la pluma Complejidad de la hidrogeología
Diseño del Sistema (k)	Honorarios de Consultores Tiempo de Cómputo	Complejidad de la Hidrogeología Tamaño del sistema
Sistema de Pozos (k)	Construcción del Pozo Materiales	Tamaño de la Pluma Flujo del Acuífero Transmisibilidad
Infraestructura Superficial (k)	Caminos de Acceso Potencia de Transmisión Tubería	Tamaño de la Pluma Configuración de los Pozos
Instalaciones de Tratamiento (k)	Construcción Sistemas de Tratamiento	Sistema de Descarga Concentración y Composición del agua Recuperada
Sistema de Pozos (O y M)	Operación de bombas (potencia)	Flujo del acuífero Profundidad de bombeo Fluidos Corrosivos
Instalaciones de Tratamiento (O y M)	Químicos Mano de Obra Potencia	Sistema de Descarga Concentración y Composición del agua Recuperada
Monitoreo	Muestreo Análisis Reporte	Complejidad del Sistema

k denota costos de capital; O y M denotan costos de operación y mantenimiento.

El último y más importante problema asociado con el análisis económico, es el planteamiento genérico a ser utilizado. St. Clair, Mc Cloukey y Sherman (1982) analizan las ventajas y desventajas de varios planteamientos, incluyendo la evaluación del riesgo, análisis del costo-beneficio, análisis de costos efectivos, y análisis de sensibilidad. Utilizando los atributos positivos de estos planteamientos St. Clair, Mc Cloukey y Sherman (1982) tienen desarrollada una estructura de trabajo para evaluar los costos efectivos de acciones de restauración en sitios no controlados de desechos peligrosos.

Evaluación Ambiental.- Cada una de las alternativas propuestas debe ser analizada por su impacto potencial sobre el ambiente. Hay una variedad de aproximaciones que pueden ser usadas para evaluar dichos impactos, incluyendo metodologías empíricas de evaluación, análisis de estructuras y otras. Las cuales nos sirven en la identificación de usos únicos de la evaluación ambiental. El primer uso a ser identificado, es la asociación de las actividades de limpieza del agua subterránea, ya que algunas alternativas pueden representar "un cometido inapelable en los recursos naturales", algunas alternativas pueden requerir que el acuífero permanezca permanentemente alterado. Esto es especialmente cierto de tecnologías tales como barreras impermeables. Segundo, las consecuencias superficiales de las acciones de restauración deben ser relativamente fáciles de evaluar cuando las actividades de remediación del agua subterránea son

usualmente aplicadas bajo la superficie. Más específicamente las acciones de restauración del agua subterránea, para la mayor parte, no representa grandes empleos de tierras. Dependiendo de la tecnología empleada existirá un potencial para afectar diferentes categorías ambientales. Por ejemplo: la calidad del aire, calidad del agua superficial y ruido. Debe existir una amplia información sobre las actividades relacionadas y así la evaluación de los impactos superficiales de las acciones de restauración de las aguas superficiales son simples, y menores consumidores de tiempo que la evaluación de efectos subsuperficiales.

Evaluación de Riesgos. - Este informe servirá para evaluar alternativas de rehabilitación. La evaluación de riesgos tiene que ser definida como "la identificación de peligros, la localización de la causas, la estimación de la probabilidad de daños resultantes, y el balance de daños con beneficios". Además, seleccionando una técnica efectiva de restauración involucra el balance de las necesidades para contener contaminantes en niveles aceptables contra costos asociados con las medidas de limpieza. Una evaluación de riesgo involucra la definición de los riesgos para el ambiente y salud humana de continuar la contaminación de un sitio y lo más barato de la acción de restauración al reducir los riesgos a un nivel aceptable podría ser considerado el mayor costo efectivo.

El objetivo de una acción de restauración es reducir los riesgos asociados a un nivel aceptable. La cuestión más importante asociada con la evaluación del riesgo es ¿Cómo puede ser evaluado el riesgo de

las alternativas de rehabilitación de acuíferos ?.

Hay dos propuestas generalmente aceptadas para evaluar los riesgos. La primera propuesta, es para utilizar criterios o estándares para un contaminante y trabajos utilizando propiedades intrínsecas del contaminante y del acuífero, para desarrollar una lista de posibles alternativas. La segunda propuesta, es para analizar la efectividad de varias alternativas y comparar sus concentraciones resultantes con un estándar. No importa cual propuesta sea usada, un criterio, un estándar o un nivel aceptable, estos datos para la mayor parte no existen. Dawson y Sanning (1982), diseñaron un método para marcar sitios de restauración bajo un criterio utilizando estándares de aire y agua, y trabajando con datos sobre el potencial de disolución y características de distribución. Esta metodología es dependiente de los criterios existentes para otros medios ambientales y conocimientos del mecanismo de transporte los cuales pueden ser no viables.

5.2.- LIMPIEZA POR EXTRACCION

5.2.1.- SISTEMAS DE POZOS

Los sistemas de pozos para el control de la contaminación del agua subterránea, se basan en el manejo del gradiente hidráulico por medio de inyección o extracción del agua. Son diseñados para el control del movimiento del contaminante en el agua, de manera directa o indirecta. Estos planteamientos son referidos frecuentemente al

manejo de la pluma, existen tres clases generales de sistemas de pozos, dos de ellos son pozos de extracción (sistema puntuales de pozos y sistema de pozos profundos), y el tercero es pozo de inyección, el cual es referido a un sistema de levantamiento presión. Los tres sistemas pueden requerir de la instalación de diferentes pozos en lugares seleccionados.

Construcción.- El aspecto más importante en el establecimiento de los sistemas de pozos, es la construcción de los pozos. La secuencia para la instalación incluye los siguientes pasos:

- 1) Colocación del equipo de perforación.
- 2) Perforación del pozo(s).
- 3) Instalación y cementación del contra-ademe.
- 4) Instalación de la tubería ranurada y accesorios.
- 6) Empacamiento de grava e instalación de materiales.
- 7) Desarrollo del pozo.

Cabe aclarar que no todos los pasos anteriores se requieren para cada pozo en particular.

Existen diversos métodos para la perforación inicial de un pozo como se indica en la tabla 5.8. Después de la perforación, los pasos siguientes son la instalación y cementación del ademe, prosiguiendo con la elaboración del filtro de grava.

El siguiente paso es la terminación o desarrollo del pozo, el cual consiste en hacer bombear el pozo, con la finalidad de arrastrar

todas las partículas (limpieza del pozo) presentes en el pozo después de su perforación. Existen tres resultados beneficios en el desarrollo del pozo:

- 1) Desalojo de material de perforación.
- 2) Incremento de la porosidad y permeabilidad de la formación en la vecindad del pozo.
- 3) Estabilizar la arena de formación alrededor del cedazo, de modo que el pozo produzca libremente.

Diseño.- El diseño de cualquier sistema de pozos podrá ser realizado por medio de una recopilación de información relativa a:

- 1) Estudio hidrogeoquímico de contaminación del área de interés, del cual se generan dos tipos de información:
 - a) Dimensión de la pluma contaminante (ancho, largo, profundidad y la forma en general) y el gradiente hidráulico por medio del cual se determinará el sentido de la pluma.
 - b) Características hidrogeológicas del acuífero

Tabla 5.8.- Métodos de Perforación de Pozos. (Referencia 5)

Método	Descripción del Procedimiento
Percusión	<p>Es un método que utiliza herramientas de cable, el cual consiste en levantar y dejar caer con regularidad una pesada sarta de herramientas dentro del agujero que se va abriendo. La barrena fractura o desmorona la roca dura y la convierte en pequeños fragmentos. La acción del vaivén de las herramientas entre mezcla con agua las partículas fracturadas y desprendidas, formando así un lodo. El lodo resultante debe ser retirado del agujero de tiempo en tiempo mediante una bomba de arena o de una cuchara. Cuando se acumula mucha columna de lodo, ésta amortigua la caída de las herramientas y retarda la velocidad de penetración. Tal circunstancia es la que determina con cuanta frecuencia deberá extraerse el lodo.</p>
Rotatorio	<p>Es un método hidráulico por rotación que consiste en perforar un agujero mediante la acción rotatoria de una barrena y remover los fragmentos que se producen con un fluido que continuamente se hace circular, conforme a la barrena penetra en los materiales de la formación. La barrena se fija al extremo inferior de una sarta de tuberías. En el sistema convencional rotatorio, el fluido o lodo de perforación es bombeado a través de la tubería y expulsado por las boquillas de ésta. El lodo, entonces, fluye verticalmente hasta la superficie a través del espacio anular que se halla alrededor de la tubería. Ya en la superficie del terreno, el lodo se conduce hasta las presas. Aquí es de nuevo succionado por la bomba una vez libre de sedimentos.</p>
Perforación de Circulación Inversa	<p>Este método se efectúa invirtiendo la circulación del lodo de perforación, a diferencia del método rotatorio convencional. El extremo de aspiración de la bomba, en lugar del descarga, se conecta al vástago giratorio a través del eslabón superior y de allí a la tubería de perforación. Esta vez el lodo de perforación con su carga de fragmentos y cortaduras se desplaza hacia arriba por dentro de la tubería y es descargado por la bomba a la presa de sedimentación. El fluido retorna al agujero mediante flujo gravitacional. En esta forma, se desplazará hacia abajo, a través del espacio anular que rodea a la tubería, hasta alcanzar el fondo del agujero, atrapando a su paso fragmentos y recortes que vuelven a entrar a la tubería de perforación por las aberturas existentes en la barrena.</p>

Continuación tabla 5.8.

Método	Descripción del Procedimiento
Perforación a chorro	<p>En este método la operación se caracteriza por el empleo de un chorro de fluido a presión.</p> <p>Las herramientas de perforación consisten de una barrena de forma de cincel fijada al extremo inferior de una sarta de tuberías. Unos agujeros practicados en cada uno de los lados de la aleta de la barrena sirven como boquillas para dar paso a los chorros de fluido que mantienen limpia la barrena y ayudan a aflojar el material que se va perforando. Al mismo tiempo se debe bombear fluido a presiones que van desde moderadas a altas y a través de la tubería de perforación. El fluido de perforación fluye luego en forma ascendente por el espacio anular arrastrando así a los fragmentos en suspensión. El fluido descarga en superficie del terreno y de ahí es conducido a una o más presas en donde las partículas o recortes sedimentan. Desde aquí el fluido es de nuevo aspirado por la bomba y recirculado a través de la tubería.</p>
Perforación rotatoria con aire comprimido	<p>En este sistema, se hace circular aire a presión por la tubería de perforación, el cual escapa por las aberturas de la barrena, subiendo luego por el espacio anular que rodea a la tubería. El aire que se desplaza a gran velocidad dentro del anillo, arrastra los fragmentos hasta la superficie o los impulsa de las fisuras de la roca.</p>
Percusión hidráulica	<p>La perforación se ejecuta levantando y dejando caer conjuntamente la tubería de perforación y la barrena mediante carreras cortas y súbitas. Conforme a la barrena cae y golpea en el fondo, el agua que contiene en suspensión los fragmentos o recortes hacen su entrada a través de los orificios de la barrena. Cuando éste es halado, la válvula de retención se cierra y atrapa al fluido contenido en ella. Este movimiento interno produce una acción de bombeo que eleva al fluido hasta el extremo superior de la sarta de tubería de perforación, de donde descarga a un tanque de sedimentación. El fluido se hace retornar desde el tanque de sedimentación al agujero, completando así el ciclo de circulación del fluido, lo que tiene lugar en dirección inversa a la del método en chorro.</p>

Continuación tabla 5.8.

Método	Descripción del Procedimiento
Perforación con taladro	El método más generalizado de taladrar un pozo comprende la excavación del material, para lograr la profundidad del hoyo, mediante el uso de un taladro. El material que se va excavando se recoge en un cubo o cucharón cilíndrico que se halla dotado, en el fondo, de unas cuchillas cortantes, como en un taladro. El cucharón se conecta al extremo inferior de un vástago giratorio, el cual pasa a través de un gran engranaje anular, el que a su vez le imprime el movimiento de rotación como si fuese la mesa rotatoria.

Esta información podrá ser usada junto con los conceptos de hidráulica de pozos para establecer el número y espaciamiento de los pozos necesarios en la operación.

La tabla 5.9 resume los métodos que pueden ser usados para calcular el radio de influencia bajo varias condiciones de acuíferos. El diseño de un sistema de pozos envuelve un procedimiento iterativo utilizando un conjunto de gastos de bombeo, calculando el radio de influencia asociado a este gasto, y revisando el radio de influencia contra las dimensiones de la pluma.

Tabla 5.9.- Método para calcular el radio de influencia (Referencia 9)

Condición de bombeo	Método ^a
Equilibrio	
-Exacto	$\ln R_o = \frac{K(H^2 - hw^2)}{458 Q} + \ln R_o = \frac{T(H - hw)}{229 Q} + \ln r_w$
-Aproximado	$R_o = 3(H - hw) (0.47K)^{1/2}$
No equilibrado	
-Exacto	Gráfica Abatimiento vs distancia logarítmica
-Aproximado	$R_o = r_w + \left[\frac{Tt}{4790 S} \right]^{1/2}$

^aR_o = Radio de influencia (pie).

K = Permeabilidad (gpd/pie²).

H = Nivel total (pie).

hw = Nivel del pozo (pie).

Q = Gasto de bombeo (gpm).

r_w = Radio del pozo (pie).

T = Transmisibilidad (gpd/pie).

t = Tiempo (min).

S = Coeficiente de almacenamiento (adimensional).

Los sistemas de pozos deben satisfacer las tres condiciones siguientes:

1) El sistema de recuperación debe localizarse lo suficientemente cerca a los límites de la pluma, gradiente abajo para revertir el gradiente hidráulico en este límite.

2) La descarga total debe de ser lo suficientemente grande como para crear fronteras de líneas de flujo que limiten a la pluma en su parte superior hacia la parte más ancha gradiente arriba del sistema de pozos; y

3) El abatimiento del nivel del agua resultante de la extracción del sistema, no deberá de exceder los límites que son una función del espesor saturado del acuífero.

El sistema puntual de pozos involucra un número de espaciamiento menor, en la superficie cada pozo se conecta a una tubería principal que son conectados a una bomba central de succión. Estos sistemas son usados solamente para acuíferos someros debido a que el máximo abatimiento que se obtiene durante la succión, es la diferencia entre el límite de succión de la bomba y la distancia del nivel estático del agua al centro de la bomba. El límite superior del levantamiento del agua por el sistema de succión es de alrededor de 25 pie. El sistema de bombeo por succión se describe en la FIG. 5.3 (Johnson Division, UOP Inc., 1975). El sistema puntual de pozos deberá estar diseñado de tal forma que el radio de influencia (cono de abatimiento) del sistema intercepte completamente la pluma contaminante, como se muestra la FIG. 5.4 a.

Los sistemas de pozos profundos son similares al puntual, excepto

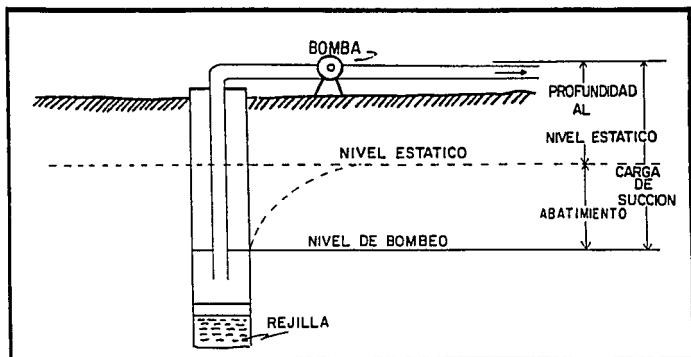


FIG. 5.3 EN POZOS DE EXTRACCION, EL MAXIMO ABATIMIENTO OBTENIBLE ES LA DIFERENCIA ENTRE EL LIMITE DE SUCCION DE LA BOMBA Y LA DISTANCIA DEL NIVEL ESTÁTICO AL CENTRO DE LA BOMBA, (Referencia 9).

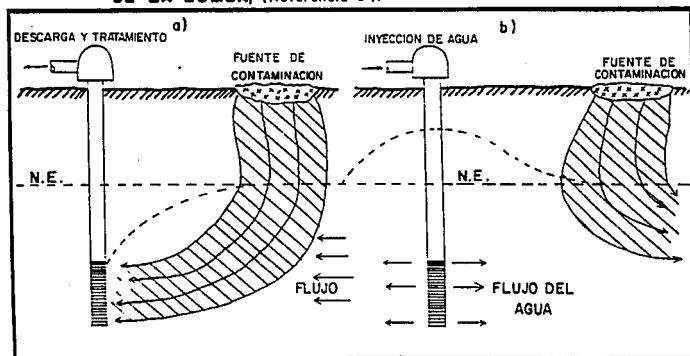


FIG. 5.4 SISTEMAS DE POZOS a) Principio de pozos de extracción b) Principio de pozos de inyección, (Referencia 9).

que estos son usados para profundidades mayores y son usualmente de bombeo individual.

El sistema de levantamiento de presión puede ser conceptualizado como el inverso de los dos sistemas anteriores, este sistema utiliza la inyección de agua de manera que se forma una barrera al agua subterránea. La FIG. 5.4 b describe el fenómeno de este tipo de sistema. Estos sistemas tienen una aplicación amplia en Areas costeras para prevenir la intrusión salina.

La base de diseño para los tres sistemas estriba en que el movimiento del contaminante en el agua subterránea sea completamente controlado.

Al igual que los sistemas anteriores, por medio del uso de la información obtenida de un estudio hidrogeoquímico y los principios de hidráulica de pozos, se puede obtener: el número, profundidad y espaciamiento de pozos. Además, se puede obtener una estimación del tiempo requerido de rehabilitación.

Aplicación en la Recuperación de Hidrocarburos.- A continuación se presentan cuatro sistemas óptimos para la recuperación de hidrocarburos (Blak y Lewis, 1982): 1) Bombeo individual, utilizando un pozo de recuperación; 2) Bombeo individual utilizando varios pozos; 3) Bombeo doble utilizando dos pozos de recuperación ; y 4) Bombeo doble utilizando un pozo de recuperación. El sistema de bombeo individual utilizando un pozo se muestra en la FIG. 5.5 a. La ventaja de este sistema es que requiere poco equipo y bajo costo de perforación. Sin embargo, este sistema produce una

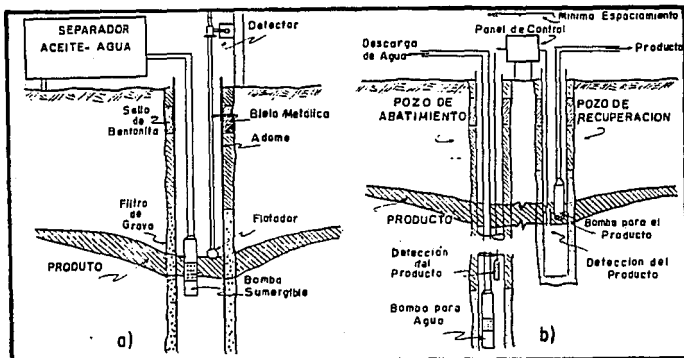


FIG. 5.5

a) SISTEMA UTILIZANDO UNA BOMBA SUMERGIBLE Y UN FLOTADOR

b) SISTEMA UTILIZANDO DOS BOMBAS EN DOS POZOS DISTINTOS, (Referencia 9).

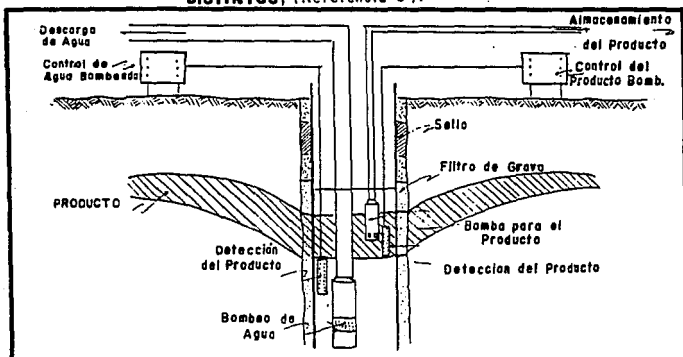


FIG. 5.6 (Referencia 9).

mezcla aceite-agua requiriendo una separación en superficie. Un bombeo individual utilizando varios pozos puede ser complicado por la colocación de pozos individuales, pero estos pueden ser más factibles en formaciones de baja permeabilidad.

Los sistemas de bombeo doble utilizando dos pozos, se describen en la FIG. 5.5 b, el propósito del pozo profundo, es el de producir un gradiente con dirección al pozo somero (pozo de recuperación). La ventaja de este sistema es la habilidad de recuperar el producto y separar el agua del aceite; una desventaja es el incremento del costo por múltiples pozos. Adicionalmente, este tipo de sistemas puede requerir un sofisticado equipo de monitoreo para asegurar la exactitud de la operación.

El sistema más deseable en la recuperación del producto es aquel que involucra dos bombeos en un pozo, como el que se muestra en la FIG. 5.6, el cual puede ser completamente automatizado. La desventaja del sistema incluye: un mayor diámetro del pozo; equipo de monitoreo costoso y una inspección frecuente.

Ventajas y Desventajas. - El uso de sistemas de pozos, probablemente es el método más utilizado en el control de la contaminación, representan la medida más segura para el control del flujo subterráneo de contaminantes. Una comparación de algunas ventajas y desventajas de los sistemas de pozos, se muestran en la tabla 5.10.

Tabla 5.10.- Ventajas y Desventajas del Sistema de Pozos (referencia 9)

Ventajas	Desventajas
1.- Aseguran una efectiva y eficiente medida para el control de la contaminación	1.- Los costos de operación y mantenimiento son altos.
2.- Pueden ser fácilmente instalados	2.- Requieren continuo monitoreo después de la instalación.
3.- Previamente instalados los pozos de monitoreo pueden a veces ser empleados como parte del sistema de pozos.	3.- Los sistemas de extracción necesariamente sacan agua limpia (en exceso) junto con agua contaminada.
4.- Pueden algunas veces incluir recarga del acuífero como parte de la estrategia.	4.- Algunos sistemas pueden requerir el uso de modelos matemáticos sofisticados para evaluar su efectividad.
5.- Mayor flexibilidad de diseño	5.- Los sistemas de extracción usualmente requerirán tratamiento superficial.
6.- Los costos de construcción pueden ser más bajos que barreras artificiales.	6.- La aplicación en suelos finos es limitada.

5.2.2.- SISTEMAS INTERCEPTORES

Los sistemas de intercepción involucran la excavación de una zanja bajo el nivel del agua, y permiten la colocación de un tubo en la zanja. Los drenes o zanjas subterráneos funcionan de manera similar a una línea infinita de pozos de extracción, esto es, producen una zona continua de depresión a lo largo de la zanja de drene. La

FIG. 5.7 describe una zanja de intercepción. Generalmente la zanja contiene una tubería perforada y material grueso de relleno para mejorar la recolección y transporte del agua que entra.

5.2.2.1.- CONSTRUCCION

Drenes colectores. - La construcción de sistemas de intercepción es relativamente simple e involucra la excavación de un sistema de zanjas, la colocación de tuberías perforadas en la zanja, y el relleno con un material grueso como la grava. Generalmente los sistemas colectores consisten de una serie de tuberías de alimentación (laterales) que descargan a una tubería principal colectora (cabezal) como se muestra en la FIG. 5.8. Del cabezal, el agua colectada fluye a un sumidero en donde será bombeada a la superficie para su tratamiento y/o descarga. Los sistemas colectores usados de un modo preventivo, como el sistema colector de lixiviación, generalmente incluyen una serie de drenes laterales de 4 a 6 pg de diámetro dentro del colector principal de 8 a 12 pg, con arreglos de diseño como los mostrados en la FIG. 5.9.

Los sistemas de intercepción usados en forma de abatimiento se pueden clasificar como drenes de relieve o drenes interceptores. Los drenes de relieve se instalan en áreas donde el gradiente hidráulico es relativamente bajo. Estos se usan generalmente para disminuir el nivel del agua debajo de cierto lugar o para prevenir la contaminación a mayor profundidad, bajo el acuífero. Los drenes de relieve se

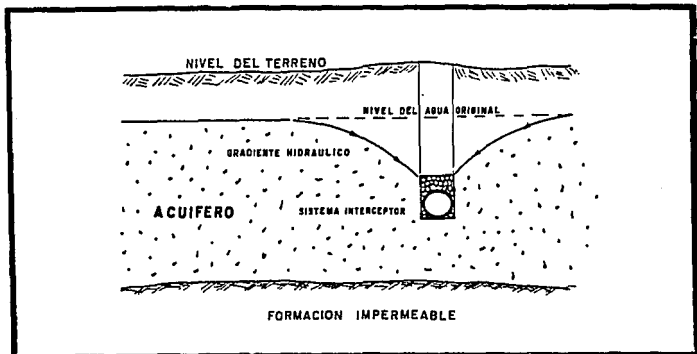


FIG. 5.7 GRADIENTE HIDRAULICO CON DIRECCION AL SISTEMA INTERCEPTOR (Referencia 9).

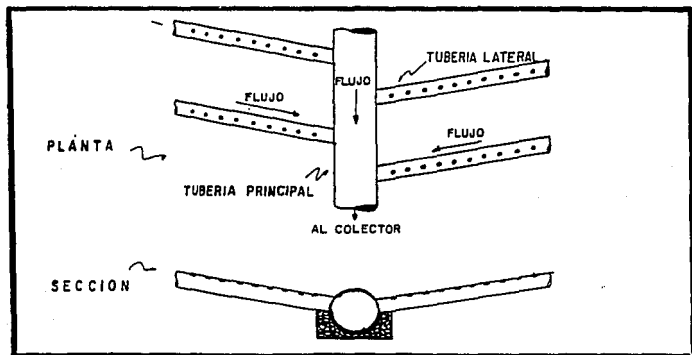


FIG. 5.8 SISTEMA DE RECOLECCION POR DRENES, (Referencia 9).

instalan en paralelo en cualquiera de los costados de dicho lugar de tal forma que sus áreas de influencia se traslapen y el agua subterránea contaminada no fluya entre las líneas de drenaje. Este puede ser instalado alrededor de todo el perímetro del lugar.

Los drenes de intercepción se utilizan para coleccionar el agua subterránea de una fuente gradiente arriba para prevenir la lixiviación de pozos cercanos y/o del agua superficial situada hidráulicamente gradiente abajo del lugar. Estos se instalan de forma perpendicular al flujo del agua subterránea. Se pueden necesitar un solo drenaje de intercepción localizado en el extremo del terreno de relleno, o dos o más interceptores paralelos, dependiendo de las circunstancias.

Zanjas de Intercepción. - Las zanjas de intercepción pueden ser activas (de bombeo) o pasivas (flujo por gravedad). Los sistemas activos tendrán pozos de remoción con un espaciamiento vertical medio o uno perforado, tubería de remoción horizontal (drenaje colector) en el fondo de la zanja. Los sistemas activos generalmente están llenos de una arena gruesa o grava para darle estabilidad a las paredes. Los sistemas se utilizan casi exclusivamente para la recolección de contaminantes que fluyen en la superficie del agua (por ejemplo, aceites e hidrocarburos). Los sistemas pasivos generalmente se dejan abiertos con instalación de una bomba para la capa superior de la mancha y de esta forma remover únicamente el contaminante. Todas las zanjas de intercepción requieren de una excavación de al menos 3

o 4 pies abajo del nivel del agua para prevenir el escape del contaminante que fluye y para acelerar el flujo del posterior contaminante libre (American Petroleum Institute, 1980). En sistemas activos la capacidad de bombeo debe ser lo suficientemente grande como para mantener el abatimiento del agua en el fondo de la zanja. Además, el bombeo (sistema activo) o "desnate" (sistema pasivo) debe ser continuo, o el contaminante recolectado tenderá a filtrarse dentro de las paredes de la zanja y continuar gradiente abajo (American Petroleum Institute, 1980).

La actividad principal de construcción asociada con las zanjas de intercepción es la excavación de la zanja. Esto puede lograrse con equipo convencional. La amplitud de la zanja debe ser lo suficientemente grande como para acomodar las tuberías o las bombas si es necesario, si bien está, deberá ser lo suficientemente cercana a la superficie para minimizar la cantidad de sólidos remobidos. Los sistemas activos (de bombeo), requerirán profundidades más grandes, para acomodar las tuberías o bombas. Se a sugerido (American Petroleum Institute, 1972-80) que la pared gradiente abajo de la zanja esté recubierta con un material impermeable como película de Polietileno para prevenir que los contaminantes flotantes pasen a través de la zanja y continuen gradiente abajo. Sin embargo, Pastrovich y Col. (1979) indican que la contaminación tenderá a encontrar su camino alrededor de los extremos de la barrera y penetrará más allá, mientras que el equilibrio de la presión hidrostática sobre ambos lados de la película provocará que el contaminante flote lejos de la pared. Como se anotó anteriormente,

la remoción continua de los contaminantes y del agua de la zanja causará el abatimiento de ambos lados de la zanja. De esta forma se previene la posterior migración del contaminante.

Después de la excavación de la zanja, el sistema pasivo generalmente requerirá de la instalación de una bomba de desnate. Los sistemas activos requerirán de la instalación de pozos de remoción o drenes de recolección, con el subsecuente rellenado de la zanja con arena gruesa o grava.

5.2.2.2.- DISEÑO

Drenes de Recolección.- Los parámetros principales de diseño para el sistema de drenaje de recolección son: 1) el diámetro de la tubería y 2) el espaciamiento de la tubería. Para determinar el diámetro de la tubería requerido, se supone que la capacidad de acarreo de la tubería es igual a la filtración de diseño, y la velocidad en la tubería está dada por la ecuación de Mannings. La ecuación resultante de forma simplificada es:

$$d = 0.892(SC)^{0.375} (A)^{0.375} (s)^{-0.1875} \quad (5.1)$$

donde: d = Diámetro interior de la tubería, pg.
 A = Área de drenaje, acre.
 SC = Coeficiente de filtración, pg/día.
 s = Gradiente hidráulico.

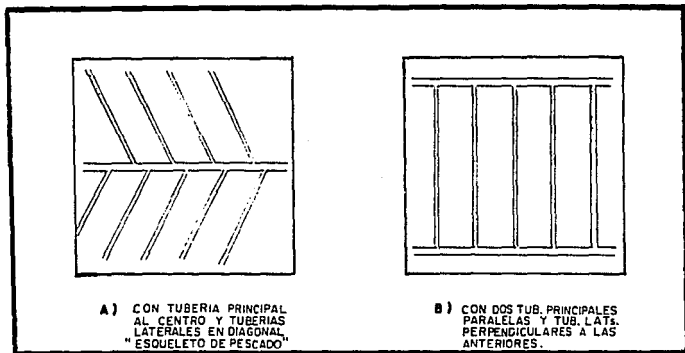


FIG. 5.9 ARREGLOS DE LOS SISTEMAS DE RECOLECCION (Referencia 9).

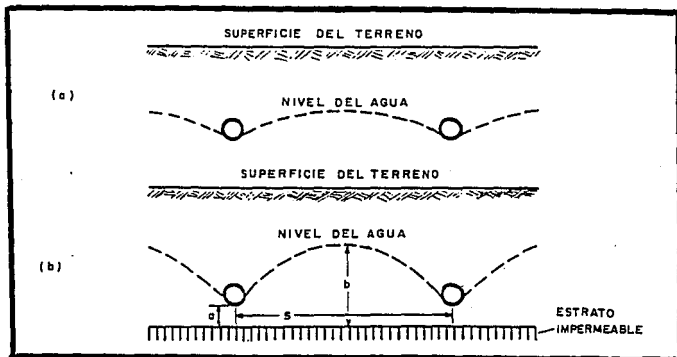


FIG. 5.10 FORMAS DEL NIVEL DEL AGUA ADJUNTO A LOS DRENES
 a) relativamente permeable
 b) bajo permeabilidad, (Referencia 9).

Para propósitos de diseño del espaciamiento de drenes de la teoría Dupuit-Fochheimer la superficie del agua subterránea entre dos líneas delgadas puede tomarse como una porción de una elipse como se muestra en la FIG. 5.10 y descrita como sigue:

$$\frac{S^2}{(b^2 - a^2)} = \frac{4k}{R} \quad (5.2)$$

- donde:
- S = Espaciamiento entre las líneas de drenaje (m).
 - a = Profundidad a la barrera impermeable bajo el drenaje (m).
 - b = Profundidad a la barrera impermeable equidistante a los drenes (m).
 - k = Conductividad hidráulica del suelo (m/día).

Zanjas de intercepción. - El orden para decidir la posición de las zanjas de intercepción está dado por el flujo del agua, la relación entre la profundidad y el flujo, y se debe conocer la influencia del gradiente tanto superior como inferior de la zanja. La influencia del gradiente superior puede determinarse por la siguiente ecuación (Kufs, 1983):

$$D_u = \frac{4}{3} H \tan \theta \quad (5.3)$$

- donde:
- D_u = Distancia efectiva de abatimiento del gradiente superior (m).
 - H = Espesor saturado del estrato no afectado por el drenaje (m).
 - θ = Angulo entre el nivel del agua inicial o superficie del terreno y el plano horizontal.

La expresión teórica para el gradiente inferior se presenta a continuación:

$$D_d = \frac{K \tan \theta}{q} (h_1 - h_2 + D_2) \quad (5.4)$$

donde: D_d = Distancia del gradiente inferior del drenaje donde el nivel del agua es disminuida a la profundidad deseada (m).

k = Conductividad hidráulica (m/día).

q = Coeficiente de drenaje (m/día).

h_1 = Profundidad efectiva del drenaje (m).

h_2 = Profundidad deseada al nivel del agua después del drenaje.

D_2 = distancia de la superficie del terreno al nivel del agua antes del drenaje a la distancia D_d (m).

Ventajas y Desventajas. - La tabla 5.11 lista algunas de las ventajas y desventajas particulares de los drenes subterráneos (sistemas interceptores). La ventaja más obvia del sistema interceptor, es que estos son métodos relativamente sencillos en su construcción, por el contrario tienen la desventaja de requerir un monitoreo y mantenimiento continuo. Otras ventajas del sistema interceptor son:

- 1.- No sólo son fáciles, sino que también económicos.
- 2.- Útiles para interceptar filtraciones y escurrimientos en

lugares de desecho.

- 3.- Útiles para coleccionar lixiviados en suelos poco permeables.
- 4.- Extensos perímetros húmedos permiten altos gastos de flujo.
- 5.- Posibilidad de un monitoreo y recuperación de los contaminantes; y
- 6.- Producen mucho menos fluido para ser manejado que los sistemas puntuales de pozos.

Desventajas del sistemas de intercepción

- 1.- Cuando exista disolución de los componentes será necesario seguir o monitorear el agua subterránea gradiente abajo de la línea de recuperación.
- 2.- Los sistemas abiertos requieren de precauciones en la seguridad para prevenir incendios o explosiones;
- 3.- Las zanjas interceptoras son menos eficientes que los sistemas puntuales de pozos.
- 4.- Los costos de operación y mantenimiento son altos.
- 5.- No se puede utilizar para lugares de depósito profundos; y
- 6.- Pueden interferir con el uso de la tierra.

Tabla 5.11.- Ventajas y Desventajas de los Drenes Subterráneos (Referencia 9)

Ventajas	Desventajas
1.- Los costos de operación son relativamente económicos ya que el flujo por debajo del dren es por gravedad.	1.- Ninguna zanja puede localizarse en suelos poco permeables.
2.- Proporciona un medio de recolección de lixiviado sin el uso de revestimientos impermeables.	2.- En la mayoría de los casos no habrán facilidades para ubicar los drenes debajo de un lugar determinado.
3.- Se dispone de una amplia flexibilidad para el diseño de drenes, el espaciamiento puede incrementarse ajustando la profundidad o modificando el material.	3.- El sistema requiere de un monitoreo continuo y cuidadoso para asegurar la adecuada recolección de los lixiviados.
4.- El sistema es bastante confiable, siempre que exista un monitoreo continuo.	
5.- La construcción de los métodos son sencillos.	

5.3.- TRATAMIENTO IN-SITU

El tratamiento de agua subterránea por tecnología in-situ es hasta ahora relativamente nueva, sin embargo, ha recibido una mayor atención, y la aplicación práctica de esta tecnología se ha incrementado. El objetivo principal de las tecnologías in-situ es llevar a cabo un tratamiento de los contaminantes en el sitio por medio de procesos químicos o biológicos.

5.3.1.- TRATAMIENTO QUIMICO

El tratamiento químico in-situ del agua subterránea puede ser considerado sólo en casos donde los contaminantes son conocidos y los niveles y extensión del agua contaminada en el acuífero son definidos. El orden para la utilización del tratamiento químico es:

- 1) Estabilizar el control hidráulico superficial.
- 2) Delinear los límites de la pluma contaminante.
- 3) Introducción del agente de tratamiento en el subsuelo para reaccionar con el contaminante.

El tipo de reacción dependerá del contaminante y podrá ser: oxidación, reducción o polimerización. Es importante hacer notar que en este caso el contaminante no es removido, únicamente se inmoviliza.

En Finlandia se desarrolló un método denominado "Vyredox" que consiste en la inyección periódica de oxígeno en la zona saturada para

precipitar hierro y retener magnesio. Actualmente el magnesio es utilizado por bacterias, así este método es una combinación de químico-biológico.

5.3.2.- TRATAMIENTO BIOLÓGICO IN-SITU

En el tratamiento biológico in-situ ciertos microorganismos que en la presencia de nutrientes adecuados y bajo condiciones ambientales favorables, utilizan constituyentes químicos como fuente alimenticia o sustento. Los productos de estas reacciones bioquímicas son organismos más simples y por último dióxido de carbono y agua. Por lo tanto, la técnica biológica in-situ, simplemente intenta revertir ambientes subsuperficiales afectados orgánicamente dentro de una biodegradación.

Hay dos clases de procesos de biodegradación para aguas subterráneas y aplicación de suelos. La primera clase es llamada "Biodegradación Realzada". Estos procesos envuelven "realzamiento" de ambientes subsuperficiales a través de nutrientes y/o adición de oxígeno y permitiendo al microorganismo nativo degrade a los constituyentes orgánicos. El segundo proceso clasificado es la "Biodegradación Aclimatada". En este proceso, los microorganismos son identificados y destinados a los ambientes y constituyentes específicos, para los cuales serán introducidos y cultivados. Estos microorganismos aclimatados son entonces introducidos a la

subsuperficie para proveer semillas biológicas para el proceso de tratamiento.

Ambos procesos in-situ son usualmente complementarios a diversas tecnologías, incluyendo: extracción de agua subterránea, tratamiento en superficie del agua, reinyección o descarga en superficie del agua subterránea tratada. Una descripción esquemática de operaciones de tratamiento in-situ se muestran en la FIG. 5.11.

Aplicaciones previas de tecnologías in-situ son destinadas a casos que involucran relativamente derrames pequeños de hidrocarburos dentro de suelos altamente permeables con niveles de agua poco profundos. Raymond, Jamison y Hudson establecen que la permeabilidad no es factor importante para la degradación in-situ. Conservadoramente Brubaker y O'Neill dijeron que las características hidrogeológicas de un sitio representa el factor crítico que afecta la movilidad de nutrientes a través del área contaminada. Mckee, Laverty y Hertel notaron que la degradación se manifiesta con mayor relevancia en la zona de aereación arriba del nivel del agua.

Sin bien, las aplicaciones de biodegradación in-situ realizada son realizadas; por ejemplo, involucrando hidrocarburos, ahí aumenta el interés en otros contaminantes orgánicos, comúnmente encontrados en aguas subterráneas y suelos.

El éxito de uno u otro tipo de los procesos de biodegradación in-situ dependen del desarrollo y mantenimiento de una población de microorganismos capaces de utilizar de varios contaminates. Zajik y Daugolis sugirieron que mezclas de poblaciones microbianas son

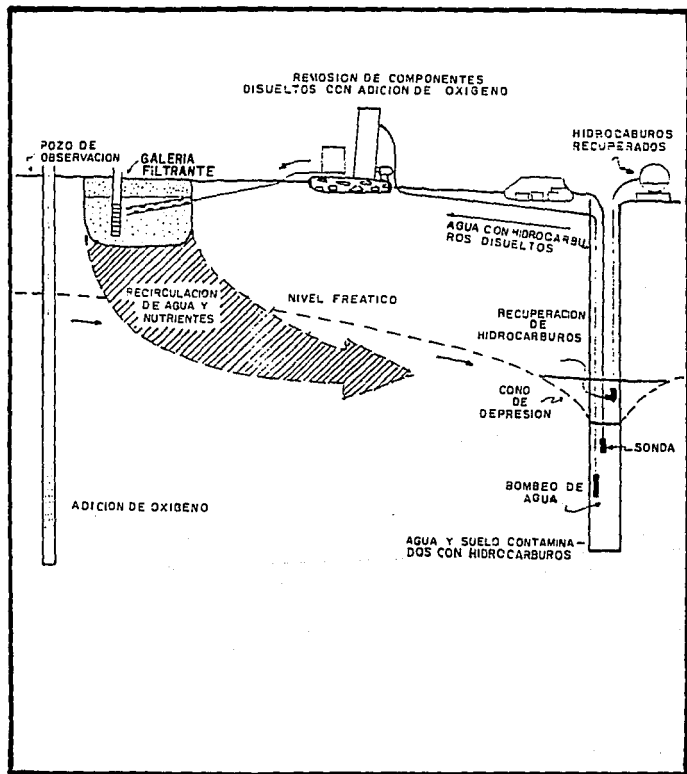


FIG. 5.11 OPERACIONES TÍPICAS PARA PROCESOS DE BIODEGRADACION IN-SITU (Referencia 8).

necesaria para degradar todos los contaminantes que estan presentes en un sitio. Raymond reforzo este punto anotando que semillas oxigenadas juegan un mayor rol en la degradación de hidrocarburos, porque algunos microorganismos no son hábiles como componentes con su sola fuente de alimentación. Como se describe en la FIG. 5.11. Las tecnologías in-situ usualmente involucran algunos tipos de sistemas de inyección/extracción. Los sistemas de inyección/extracción son diseñados para desarrollar el control hidráulico sobre el movimiento de los contaminantes o aguas subterráneas contaminadas. Adicionalmente un objetivo igualmente importante de los sistemas inyección/extracción es para transportar nutrientes y oxigenar a los microorganismos subsuperficiales.

El tiempo y el costo de un programa de tratamiento in-situ son significativamente afectados por la cantidad de nutrientes necesitados y el gasto a los cuales pueden ser inyectados. Los requerimientos exactos de nutrientes para aplicaciones en aguas subterráneas tienen que ser determinados en el laboratorio y tener variaciones considerables de muestras entre acuíferos.

No sólo varía la necesidad de nutrientes de acuífero a acuífero; la condición de los nutrientes depende también del acuífero específico. Los nutrientes pueden ser administrados de uno u otro; sin embargo, Raymond reportó que la alimentación en conjunto puede ser más económica que la alimentación continua. La suma total de nutrientes puede ser estimada de un análisis de laboratorio y la extensión de la contaminación subsuperficial.

La mayoría de los éxitos proyectos de tratamiento biológico in-situ tiene relación sobre procesos aerobicos. Prescindiendo de los tipos de procesos in-situ usados; la eficiencia y el gasto de remoción dependerá de la adición de oxígeno. El oxígeno disuelto puede ser el factor limitante para la degradación in-situ. Las tempranas mediciones para el abastecimiento de oxígeno a sistemas de agua subterránea simplemente involucra inyección de aire comprimido a través de difusores de carbón o tuberías perforadas.

Porque operación de sistemas mecánicos abastecedores de aire pueden ser caros y propensos a un mal funcionamiento, muchos intereses tienden a ser expresados en medios químicos de oxígeno disuelto. El Instituto Research de Texas Inc. está examinando la factibilidad de inyección de peróxido de hidrógeno para incrementar el contenido de oxígeno disuelto en aguas subterráneas contaminadas. Esta investigación muestra que el peróxido de hidrógeno en niveles bajos como 25% puede ser tóxico a microorganismos y que microorganismos maduros pueden utilizar el peróxido mejor que organismos juvenes. La sugerencia de la adición de peróxido de hidrógeno es gradualmente en fases. Nagel reportó que el agua subterránea contaminada puede ser extraída y tratada con ozono, entonces se puede asignar para infiltrarla nuevamente al acuífero. Estos incrementos de nivel de oxígeno disuelto aumentaron la biodegradabilidad de las aguas subterráneas. La dosis de oxígeno fué poco menos 1 gramo de ozono por gramo de carbón orgánico disuelto. Norris y Brow obtuvieron éxito al utilizar soluciones estabilizadas de peróxido de hidrógeno. Estas

soluciones proveen oxígeno a 25 tiempos, al gasto de aire. y se obtuvieron resultados mejorados en costos efectivos.

La condición común de la técnica para el tratamiento in-situ de agua subterránea y suelos, incluye la extracción de agua subterránea y tratamiento en superficie seguida por una u otra adición de nutrientes y reinyección o descarga superficial. Algunos procesos convenientes de tratamiento del agua residual a base de organismos podrían ser concebiblemente usados para tratar el agua subterránea extraída; sin embargo, algunos procesos poseen distintas ventajas. Los procesos biológicos (actividad de sedimentación, discos biológicos, filtros trampa) podrían proveer un amplio abastecimiento de organismos aclimatados. Aire comprimido y ozonización provista de oxigenación de agua previa a la reinyección. Como previamente se ha indicado, el oxígeno es frecuentemente el factor limitante para los procesos de biodegradación in-situ.

Tiene que ser bosquejada una serie de pasos requeridos en el diseño de un proceso de biodegradación realizada. El primer paso es la investigación de la hidrogeología y extensión de la contaminación. Precedido de un estudio de laboratorio para determinar si la microflora puede degradar a los contaminantes y que nutrientes podrían ser necesitados. Después los requerimientos microbianos tienen que ser establecidos, los sistemas de inyección/extracción deben ser diseñados. El diseño de un sistema de inyección/extracción es difícil, pues es requerido que el flujo vaya a través de la zona de contaminación. La recirculación de la extracción de agua es

recomendable por que se eliminan los problemas de depositación y concede para la recirculación de los nutrientes no utilizados. La ventajas, desventajas y factores de diseño para la biodegradación realizada son listadas en la tabla 5.12.

Los pasos de diseño de un sistema de biodegradación aclimatada son similares a los de la biodegradación realizada excepto aquellos más involucrados. Es necesario que los estudios de laboratorio identifiquen los microorganismos específicos requeridos para degradar todos los contaminantes concernientes implicados. La identificación de estos microorganismos se lleva a cabo tomando una muestra de suelo contaminado o de agua subterránea y se aíslan varios cultivos en los que se piense que estén presentes. Una vez que los microorganismos necesarios han sido identificados es posible desarrollar una "semilla" biológica o población de organismos inoculados en la superficie. La semilla biológica se puede desarrollar por dos procesos:

Por enriquecimiento del medio de cultivo o por manipulación genética. El primero estriba en una serie de pasos en un cultivo bioquímico diseñado para aislar microorganismos contaminantes específicos. Si un microorganismo ideal no existe o no puede ser aislado, se puede utilizar la manipulación genética para desarrollar uno artificialmente. En tal aplicación se puede utilizar la radiación. Habiendo identificado y desarrollado la semilla biológica se procede a diseñar los procesos como ya han sido descritos previamente por la biodegradación realizada. Las ventajas, desventajas y factores de diseño para la biodegradación aclimatada se enlistan en la tabla 5.13.

Tabla 5.12.- Ventajas, desventajas y factores de diseño para tratamiento de biodegradación Realizada. (Referencia 8)

Ventajas	Desventajas	Factores que afectan el desempeño.
<p>1.- Útil para la remoción de hidrocarburos y otros organismos a bajos niveles, los cuales podrían ser difíciles por otras formas.</p> <p>2.- Ambientalmente sano por generar productos de desecho y no hacer cambios ecológicos, porque utilizan microorganismos autóctonos.</p> <p>3.- Rápido, seguro y generalmente económicos.</p> <p>4.- El tratamiento se mueve con la pluma.</p> <p>5.- Bueno para tratamiento de lapsos cortos de agua subterránea contaminada.</p>	<p>1.- No aplicable para metales pesados y ciertos organismos.</p> <p>2.- Las bacterias pueden obstruir el suelo y reducir la circulación.</p> <p>3.- Los nutrientes pueden afectar adversamente cerca de la superficie de agua.</p> <p>4.- Residuos pueden causar problemas de mal olor.</p> <p>5.- Pueden ser caros a tiempos largos de inyección de nutrientes, si equipo de mantenimiento son necesitados.</p> <p>6.- Para altas concentraciones de biodegradantes de contaminantes son más bajos que para métodos físicos de recuperación.</p> <p>7.- A tiempos largos efectos desconocidos.</p> <p>8.- Regularmente difícil aceptación a obtener.</p> <p>9.- Puede no reducir concentraciones a partes por billón sin tecnología complementaria.</p>	<p>1.- Nivel de oxígeno disuelto.</p> <p>2.- pH</p> <p>3.- Temperatura</p> <p>4.- Potencial oxidación - reducción.</p> <p>5.- Factibilidad de nutrientes.</p> <p>6.- Salinidad.</p> <p>7.- Concentración de contaminantes.</p> <p>8.- Número y tipo de organismos.</p>

Tabla 5.13.- Ventajas, Desventajas y Factores de Diseño para Tratamiento de Biodegradación Aclimatada. (Referencia 8)

Ventajas	Desventajas	Factores que afectan el desempeño.
1) Microorganismos pueden ser destinados para contaminantes.	1) Los diseños preliminares son más complejos, consumidores de tiempo, y más costosos que la biodegradación realizada.	1) Niveles de oxígeno disuelto.
2) Procesos de degradación productos más rápidos.	2) Inyección de semilla puede causar taponamiento.	2) pH.
3) La semilla puede ser inyectada juntamente con nutrientes.	3) Presencia de toxinas pueden destruir semillas.	3) Temperatura
4) Posibilidades para desarrollar microorganismos para degradar contaminantes "inmunes" a poblaciones nativas.	4) Competición con poblaciones de microorganismos nativos pueden destruir semillas. 5) Regularmente difícil para obtener aprobación. 6) Puede no reducir concentraciones a partes por billón sin tecnología complementaria.	4) Concentración del contaminante.

5.3.3.- TRATAMIENTO DE AGUA SUBTERRANEA

Por medio de la restauración más utilizada en un acuífero se remueve el agua subterránea contaminada y posteriormente se trata en la superficie y se reinyecta o descarga. Aunque existe una extensa variedad de tecnologías, las opciones para el tratamiento a utilizar en la contaminación del agua subterránea normalmente se encuentran limitadas por: separación por aire, carbón de adsorción o el tratamiento biológico para la remoción de materiales orgánicos; y por la precipitación química para remover a los inorgánicos.

Separación por aire. - Es un proceso de transferencia de masa en el cual un constituyente en solución acuosa es transferido a una solución gaseosa. La separabilidad de una sustancia dada es función de muchos factores, incluyendo la concentración del contaminante y de su constante de la ley de Henry. En general, aquellos compuestos con altas constantes son más fácilmente separados del agua. Adicionalmente las eficiencias de separación comúnmente se incrementan con la temperatura, así, con aire a altas temperaturas o con vapor se activan los agentes separadores.

Carbón de Adsorción. - La adsorción del carbón ocurre cuando una molécula orgánica es llevada a la superficie del carbón activado y retenida con el auxilio de fuerzas químicas y/o físicas. Los factores que afectan la adsorción de una sustancia incluyen:

- 1) La adsorción se incrementa cuando disminuye la solubilidad.
- 2) El pH del agua puede afectar la adsorción - (los ácidos orgánicos se adsorven mejor bajo condiciones acidicas, si hay compuestos aminos que favorezcan las condiciones de alcalinidad).
- 3) Los compuestos aromáticos y halogenados se adsorven mejor que los compuestos alifáticos.
- 4) La capacidad de adsorción decrece con el aumento de la temperatura aunque el rango de adsorción pudiera incrementarse
- 5) El caracter de la superficie del adsorbente tiene un mayor efecto sobre la capacidad y rango de adsorción - la materia prima y el proceso utilizado para activar el carbón determina su capacidad.

Las isotermas de adsorción son representaciones gráficas del equilibrio de adsorción de diferentes compuestos. A partir de una prueba isotérmica se puede determinar si un contaminante en particular puede ser o no removido efectivamente. La prueba mostraría también que la capacidad aproximada del carbón y una estimación de carbón ha requerir. Las pruebas isotérmicas proveen también de una manera conveniente al estudio de los efectos de pH y la temperatura sobre la adsorción.

Tratamiento Biológico. - Este incluye la consideración de un ambiente en el cual microorganismos aclimatados utilizarán los compuestos orgánicos en el agua como su fuente de alimentación. Este

proceso ha sido desarrollado por muchos años y aplicado ampliamente en aguas residuales, industriales y municipales. La eficiencia de un tratamiento biológico, es función de muchos factores y sólo puede ser determinado a través de tratamientos de laboratorio. Una vez que el gasto constante ha sido obtenido se diseña un sistema a escala máxima que pueda ser aplicado con el gasto del flujo, con el flujo a concentraciones requeridas.

Precipitación Química. - La adición química para remover compuestos inorgánicos está basada en el ajuste del pH de una solución en la que precipiten los compuestos inorgánicos. Los tres tipos de sistemas más comunes de adición química son: los sistemas carbonato, los sistemas hidróxido y los sistemas sulfuro. Estos últimos remueven más componentes que los otros, pero tienen la desventaja de presentar dificultad en el manejo de las sustancias químicas y pueden resolubilizar los metales fuera de los sedimentos sulfurados.

El sistema carbonato utiliza agua y el pH se ajusta entre 8.2 y 8.5 este sistema, es difícil de controlar. El sistema hidróxido es el más ampliamente utilizado en la remoción de compuestos inorgánicos y de metales este sistema utiliza tanto cal o hidróxido de sodio para ajustar el pH a un valor mayor. El sistema hidróxido es de fácil control y los reactivos químicos resultan de fácil manejo además de que produce un bajo volumen de sedimentos. Sin embargo, frecuentemente los sedimentos son difíciles de remover.

5.3.4.- PROCESO CESAR

El proceso CESAR está diseñado para solucionar el problema tanto de suelos como de aguas subterráneas contaminadas con DNAPLs. CESAR (Chemically Enhanced Solubilization for Aquifer Restoration) son las siglas con las que se designa a una Restauración de Acuíferos por Solubilización Elevada Químicamente. El proceso CESAR también resulta efectivo para algunos LNAPLs atrapados bajo el nivel freático, generado por las fluctuaciones del mismo.

5.3.4.1.- PROBLEMA DE CONTAMINACION

Muchos desechos y productos químicos importantes son conocidos como Fases Líquidas no Acuosas NAPLs (Non-Aqueous Phase Liquids). Las fases densas incluyen a los PCBs (Bifenilos Policlorinados), los solventes halogenados tales como el PCE (Percloroetileno), TCE (Tricloroetileno), Clorofluorocarbonos y los solventes no halogenados, pero sí peligrosos como la creosota, el alquitrán de hulla así como la refinería de destilaciones finales. Son particularmente las DNAPLs las que resultan un serio problema de contaminación de las aguas subterráneas, debido tanto a su uso extensivo como a sus propiedades físicas y químicas:

Las DNAPLs son más densas que el agua, dejando tras de sí las marcas de los contaminantes residuales que, atrapados en los poros por fuerzas capilares, se acumulan finalmente como estanques, cubiertos

por las capas impermeables que ahí se encuentran. Las DNAPLs acumuladas en estos estanques, pueden moverse lateralmente a lo largo de las capas de baja permeabilidad, hasta lograr desbordarse o provocar fractura a través de la unidad y aún a depresiones más profundas.

Los vapores de las DNAPLs son más densos que el aire y su peso los hará descender a través de la zona no saturada para localizarse cerca del nivel freático donde, otra vez, pueden moverse lateralmente contaminando una extensa área. Tales vapores causan una contaminación significativa de las aguas subterráneas poco profundas.

Las DNAPLs son generalmente solubles en el agua, en el rango de algunos mg/L y hasta algunos miles de mg/L. Sin embargo, en las aguas potables se presentan niveles reguladores normalmente en un rango de $\mu\text{g/L}$ o en ppb. Sólo una pequeña fracción de estos contaminantes es removida del agua subterránea por bombeo y métodos de tratamiento, mientras que la fuente actual para la mayor parte de este tipo de contaminantes resulta inalterado.

Por sus propiedades físicas y químicas, las DNAPLs libran la lucha contra su remoción rápida y completa en acuíferos bombeados de manera tradicional y aún con métodos de tratamiento, los cuales remueven solamente la fracción de los DNALS disuelta, en tanto que deja intacto el volumen de la fracción DNAPLs que se separa sin disolverse.

5.3.4.2.- METODOS DE DESCONTAMINACION

A los cuatro métodos de descontaminación tradicionales de tratamiento, es decir, bombeo-tratamiento, extracción por vapor, tratamiento biológico in-situ y excavación, seguida de tratamiento de la superficie fuera del sitio, se les considera insatisfactorios para solucionar el problema del suelo y agua subterránea contaminados con DNAPLs, por las siguientes razones:

Los métodos de bombeo por tratamiento pueden utilizarse para concentrar al contaminante, pero pueden tardar hasta 30 años o más en limpiar el subsuelo, debido a la baja solubilidad de las DNAPLs. De hecho, puede que nunca se logre regular los niveles de esta contaminación.

La extracción de vapor in-situ puede trabajarse bien para DNAPLs relativamente volátiles, pero cuando se aplica en la reparación de los no volátiles, se corre el riesgo de dejar residuos extremadamente difíciles de remover. Además, la efectividad que pudiera darse bajo el

nivel freático, está limitada.

El tratamiento biológico in-situ no se puede trabajar de manera efectiva en presencia de las DNAPLs, pues la oxidación de los contaminantes sólo puede ocurrir en la fase acuosa.

El tratamiento en la superficie y/o disposición fuera del sitio puede resultar difícil o antieconómico en muchos lugares. El proceso CESAR sustituye tanto a los procesos de bombeo-tratamiento como a los de biosolución, para los sitios contaminados con DNAPLs.

Mucho del elevado rendimiento del proceso CESAR se atribuye a la capacidad de solubilización de los surfactantes utilizados y especialmente seleccionados.

El proceso de solubilización CESAR in-situ comprende tres pasos distintos:

1.- Inyección del surfactante, para solubilizar la contaminación residual por las DNAPLs.

2.- La inyección del surfactante a altas concentraciones, para solubilizar los estanques con DNAPLs en la base del acuífero.

3.- Inyección opcional de nutrientes y oxidantes, para incrementar la biodegradación del surfactante residual y del contaminante.

La creación de un modelo numérico, usando programas de cómputo diseñados para la simulación de la solubilización permite la optimización de la inyección y extracción geométrica de los pozos con base en el régimen hidráulico inducido en el acuífero bajo reparación.

Con un modelo numérico y pruebas de laboratorio, previos al proceso CESAR en prácticas de campo, se minimiza el riesgo de una emulsión in-situ y se asegura tanto una movilización mínima de las DNAPLs como la formación de una fase líquida por separado.

El control cuidadoso de los intervalos de inyección, las presiones de inyección y el bajo bombeo, junto con el modelo numérico, contribuyen a la efectividad del proceso CESAR al reducir significativamente el tiempo de reparación y los costos en los sitios contaminados por DNAPLs.

Solubilización

Los surfactantes o agentes activos de superficie, son compuestos que tienen tanto grupos funcionales hidrofílicos como hidrofóbicos. En el punto de concentración crítica de la micela, o CMC, las partes hidrofílicas e hidrofóbicas de la molécula surfactante se orientan con respecto a otras moléculas surfactantes de tal manera que forman agrupaciones coloidales o micelas. El CMC es prácticamente alcanzado cuando la concentración surfactante alcanza aproximadamente 10^{-3} M- 10^{-5} M. Bajo el CMC, las soluciones del surfactante acuoso son capaces de incrementar un poco la solubilidad de las DNAPLs, probablemente debido a un efecto de cosolvencia. Por encima del CMC, la solubilidad aparente de las DNAPLs en la solución del surfactante acuoso se incrementa muy significativamente. Este incremento debido a la solubilización micelar, regularmente conduce a una concentración de DNAPLs disuelta de varios órdenes de magnitud, mayores a sus

solubilidades acuosas normales.

Una vez en fase micelar, los contaminantes orgánicos pueden ser rápidamente bombeados a través del acuífero al realizar una extracción de pozo en la que ocurra poca sorción. Así, una solubilización micelar no sólo incrementa significativamente la solubilidad aparente de las DNAPLs tanto en residuos como en estanques, sino también promueve su transporte en la extracción de pozos. De estos factores se deriva el proceso CESAR, que representa el incremento de la tecnología de bombeo-tratamiento.

Caracterización del sitio, muestreo y monitoreo

La esmerada investigación del sitio a caracterizar y un muestreo preciso se lleva a cabo como prerrequisito necesario para la rehabilitación. Las pruebas de sitio se dirigen a determinar los parámetros hidrogeológicos y geoquímicos de relevancia e importancia en la implementación del proceso CESAR.

Las técnicas determinísticas y geoestáticas son utilizadas para optimizar la localización de inyección y bajo bombeo de pozos, con la finalidad de asegurar un costo efectivo de rehabilitación del sitio contaminado con DANPLs. Los pozos de monitoreo se sitúan de manera óptima para asegurar que el proceso de la rehabilitación pueda ser medido y comparado con las predicciones derivadas de los modelos numéricos.

Aporte de las pruebas de laboratorio

Los análisis y pruebas de laboratorio se dirigen a seleccionar a los surfactantes cuyos requerimientos de su capacidad de solubilización incrementada sean conocidos, así como la formación de emulsión reducida, el efecto mínimo sobre tensión interfacial y post-tratamiento aeróbico o biodegradación anaeróbica.

Se llevan a cabo pruebas adicionales de laboratorio para determinar la toxicidad y biodegradabilidad de cada surfactante.

Estudios piloto

El comportamiento del surfactante en el subsuelo es simulado en el computador para cada sitio y para:

- Considerar un modelo que calibre y valide las predicciones teóricas contra los datos de un estudio piloto.
 - Compare los resultados actuales con las predicciones.
 - Anticipe y minimice la movilización de las DNAPLs.
 - Compare distintos escenarios de rehabilitación.
 - Defina/modifique la interpretación de propiedades hidrogeológicas del subsuelo.
-
- La funcionalidad del modelo incluye:
 - La solubilización del tipo de contaminante como una función de la concentración del surfactante.
 - La modificación de la tensión interfacial entre el surfactante

y el contaminante.

- La distribución heterogénea del contaminante.
- La creación de un modelo que determine los límites superior e inferior del nivel del agua.
- Los efectos de sorción para cada combinación contaminante/surfactante.
- Los efectos de porosidad en medios heterogéneos.
- El transporte y destino de los contaminantes.
- El comportamiento de la inyección y bajo-bombeo del pozo.

Instalaciones de superficie

Las instalaciones de superficie son de control de mezcla, inyección y bajo bombeo de soluciones acuosas del surfactante, así como también de extracción, concentración y disposición del contaminante. Las DNAPLs volátiles se pasan a través de una torre de separación con aire y la salida de los gases se trata de acuerdo con los estándares de regulación. Las DNAPLs no volátiles y solubilizadas se envían para su tratamiento, dependiendo de la concentración y tipo de contaminante.

5.4.- RECARGA ARTIFICIAL

Se le denomina *Recarga Artificial* al agrupamiento de técnicas especializadas y enfocadas al aumento de los recursos existentes del acuífero durante su explotación, interviniendo en forma directa o indirecta en el ciclo natural del agua, llevándose a cabo está en los procesos de recarga del acuífero, en puntos estratégicos.

Los métodos que se aplican para operar la recarga son muy variados, pero hablando en forma general se recomienda que se adapten al tipo de terreno, subsuelo, tipo de agua y aspectos socioeconómicos del lugar donde se planea llevarla a cabo.

Los principales objetivos que se persiguen en la aplicación de la recarga artificial son los siguientes :

- a) Prolongar la vida útil de los acuíferos sobreexplotados.
- b) Crear nuevas reservas.
- c) Combatir la contaminación del agua del acuífero, mediante barreras hidráulicas (zonas costeras).
- d) Aumentar o mantener los recursos del manto acuífero.
- e) Mejorar la calidad del agua recargada, por estancias prolongadas en el acuífero.
- f) Diluir las aguas existentes en el acuífero si éstas están sobrecargadas de sales.
- g) Control de la subsidencia del terreno.

h) Utilizar el acuífero como red de distribución, siendo útil el sistema una vez que se construyó el pozo y el bombeo en este, origina un descenso de su nivel, suficiente como para dar lugar a la recarga.

Dentro de los objetivos anteriormente mencionados sobresale el de prolongar la vida útil del acuífero.

5.4.1.- METODOS DE RECARGA

Antes de hacer mención de los diversos métodos de recarga artificial, es necesario diferenciar entre lo que es recarga inducida y recarga artificial, ya que en la primera no interviene la aplicación de dispositivos especializados y diseñados para la recarga como los utilizados en el segundo caso, en la recarga inducida únicamente se crean situaciones favorables a la infiltración natural, haciendo plantaciones, terrazas, o similares, para dejar penetrar un volumen mayor de agua hacia el acuífero.

En la recarga artificial se pueden citar tres sistemas principales :

- 1) Sistemas de recarga en superficie
- 2) Sistemas de recarga en profundidad
- 3) Sistemas Mixtos

En la elección acerca del tipo de sistema a utilizar influyen dos

puntos :

1) Tipo de terreno

En un principio fué más utilizado el sistema de recarga en superficie, pero con el transcurso del tiempo sobresalió el de recarga a profundidad, esto es cuando el tipo de terreno está formado por calizas y areniscas (generalmente). Mientras que en materiales de terreno del tipo aluvión, volcánicos, arenas de dunas y playas persisten los sistemas mixtos (combinación de los sistemas de recarga en superficie y a profundidad).

2) Calidad de agua de recarga

Es más aplicado, el sistema de recarga en superficie, en especial los que utilizan mayor superficie, cuando el agua es muy turbia o contaminada y no es económico su pretratamiento. Cuyo objetivo principal es la corrección de la calidad del agua por infiltración.

5.4.2.- SISTEMAS DE RECARGA EN SUPERFICIE

En estos sistemas el objetivo que se persigue es el de extender el agua buscando el contacto con una gran superficie de terreno. La utilidad de estos sistemas se manifiesta 100 % en acuíferos libres. Previamente a su realización es recomendable hacer un estudio acerca de las propiedades físicas (textura y estructura) del suelo, además de sus propiedades químicas.

Deberá conocerse la distribución de permeabilidades horizontales

y verticales y los estratos semipermeables e impermeables. Una vez reunidos todos estos datos se aplicará el método que más se apegue a las condiciones existentes.

Los métodos más usuales consisten en construir zanjas y surcos, balsas, fosas o acondicionar el cauce de un río.

Zanjas y Surcos. - Se hace circular el agua por surcos, hechos con instrumentos utilizados en campos agrícolas.

En el sistema de zanjas y surcos se necesita una gran superficie de terreno, además se requiere alta velocidad de circulación, para evitar la depositación de material fino, pero a la vez sin excederse para no provocar erosión.

El terreno deberá tener la pendiente suficiente como para permitir el avance del agua.

La configuración del sistema no tiene una forma definida, pero sin dejar de ser eficiente.

En la FIG. 5.12 se muestra una forma de realización en las proximidades de un cauce natural o de un canal.

Balsas. - Son excavaciones de porciones de terreno dentro de una superficie limitada (FIG. 5.13).

La infiltración del agua hacia el manto acuífero se lleva a cabo debido a la estancia del agua de recarga a través del almacenamiento.

La profundidad de la balsa se encuentra limitada por ciertos factores, ya que si es poco profunda, dará lugar a una reducida carga

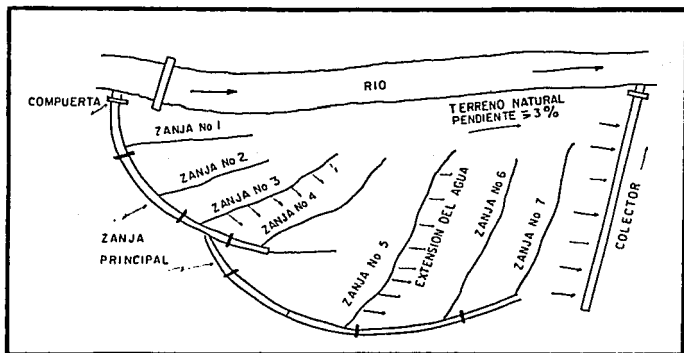


FIG. 5.12 RECARGA POR MEDIO DE ZANJAS, (Referencia 3).

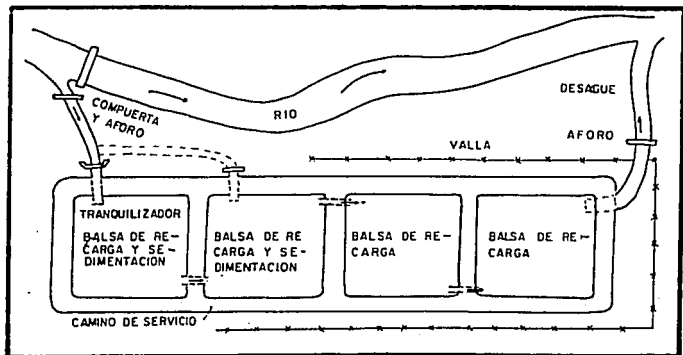


FIG. 5.13 RECARGA POR MEDIO DE BALSAS, (Referencia 3).

de agua disminuyendo a la vez el volumen infiltrado, y si es demasiado profunda, se producirá un efecto de compactación del terreno ocasionando también un decremento en el proceso de infiltración.

Pueden conectarse varias balsas a la vez, permitiendo su comunicación a través de compuertas de madera u otro material apropiado.

El mantenimiento de la balsa consiste en retirar los limos que se depositan en el fondo de éstas.

Alrededor de la balsa deberá de construirse una valla protectora, para seguridad de personas y para evitar que arrojen objetos contaminantes.

Acondicionamiento del cauce de un río. - Cuando el aspecto económico no da las facilidades para llevar a cabo la construcción de balsas y además no tenga el terreno en cuestión las condiciones que permitan el almacenamiento del agua, se procede al acondicionamiento del cauce de un río, este es aplanando, ensanchando y escarificando el lecho del mismo.

Se levantan barreras y canalizaciones a todo lo ancho del cauce, incrementando la superficie y tiempo de contacto (FIG. 5.14).

El material utilizado en la construcción de las barreras puede ser extraído del mismo cauce, pudiéndose reconstruir si se llegase a dañar con una avenida. Para ello se puede utilizar la maquinaria con la cual se realiza el mantenimiento del cauce (limpieza de limos).

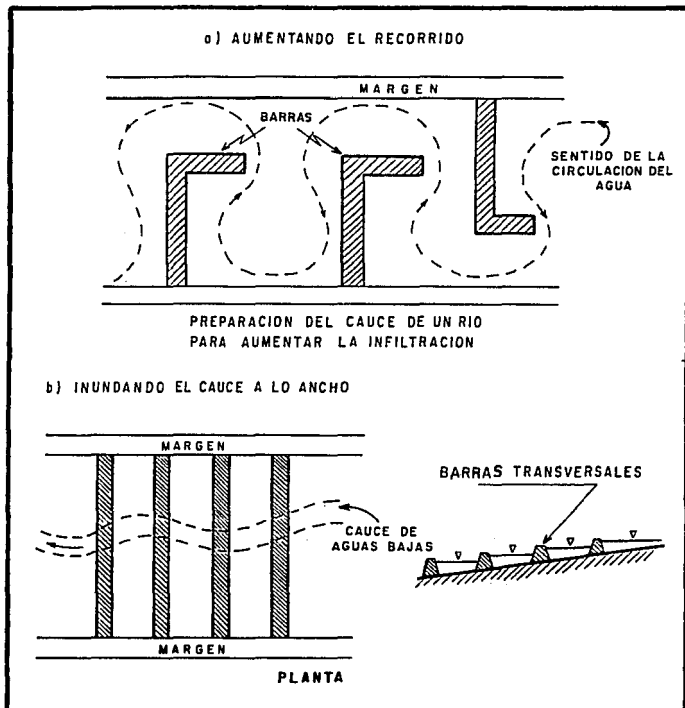


FIG. 5.14 RECARGA POR ACONDICIONAMIENTO DE UN RIO, (Referencia 3).

Fosas. - Se excava la fosa desechando basuras y objetos indeseables del terreno.

Las condiciones óptimas que deberá tener el acuífero serán : espesor grande constituido por material suelto y permeable, nivel freático profundo, esto es para facilitar la recarga a través de la fosa (FIG. 5.15).

Se coloca un filtro de arena y grava en el fondo de la fosa para mejorar la calidad del agua que se infiltra hacia el acuífero.

Las paredes laterales de la fosa deben tener un talud el cual ayude a mantener su estabilidad.

Se construye una valla al igual que la balsa, para protección de algunos niños que se pudieran acercar y para evitar el arrojado de objetos contaminantes.

5.4.3.- SISTEMAS DE RECARGA A TRAVES DE POZOS VERTICALES

Se requiere un mayor costo para su construcción y mantenimiento.

Se necesita una agua de recarga de mayor calidad para evitar la colmatación, sobre la superficie filtrante, la cual es pequeña en este caso.

Este tipo de sistema resulta ser muy adecuado, donde existe una alternancia de estratos permeables e impermeables dentro del terreno a trabajar.

Resulta ser muy óptimo, donde el costo del terreno es elevado y

en zonas urbanas, pues únicamente se necesita una pequeña porción de extensión superficial.

A través del pozo se pueden recargar varios estratos, siempre y cuando tengan las características hidráulicas adecuadas.

Los caudales que se puedan infiltrar a través del pozo, varían de acuerdo a la naturaleza del acuífero, es decir que el rendimiento del pozo está en función de las características hidráulicas del propio acuífero y del estado de colmatación del pozo.

En acuíferos confinados deberá efectuarse una buena cementación de la tubería dentro del pozo, para evitar fugas entre la pared de éste y la tubería, debido a la presión de inyección.

Los pozos deberán tener una correcta operación, después de su construcción y perforación a modo que las zonas de inyección se colmaten lo menos posible. Siendo las técnicas para su construcción las mismas aplicadas para la elaboración de pozos de bombeo.

El pozo deberá tener el mantenimiento adecuado para impedir que durante la inyección se tenga algún impedimento debido a material en suspensión, depósitos químicos, crecimientos bacterianos, con lo que la permeabilidad sufra un decremento en las paredes del pozo aladañas a la cara de la formación acuífera.

5.4.4.- SISTEMAS MIXTOS DE RECARGA

Debido a que en los sistemas de superficie se tiene el

inconveniente de capas impermeables y en el sistema de recarga a profundidad se tenga el problema de la turbidez, surge con esto la necesidad de utilizar sistemas mixtos, los cuales utilizan la combinación de los dos sistemas anteriores logrando contrarrestar los problemas anteriores (FIG. 5.16).

5.4.5.- PROYECTO Y ANALISIS DE RECARGA ARTIFICIAL

Para lograr el éxito en cualquier proyecto de recarga es conveniente establecer previamente una instalación piloto y trabajar con esta un tiempo predeterminado. Con el fin de evitar un funcionamiento deficiente que pudiese llevar nuestro proyecto al fracaso.

5.4.6.- CONSIDERACIONES PARA EL PROYECTO

Una vez que se tienen bien definidos los objetivos a seguir y el suficiente abastecimiento de agua para cubrirlos, además de las dimensiones adecuadas que deberá tener la instalación, es fundamental tomar en cuenta las siguientes consideraciones :

- Consideraciones económicas.
- Consideraciones hidráulicas.
- Consideraciones locales y geológicas.
- Calidad del agua.

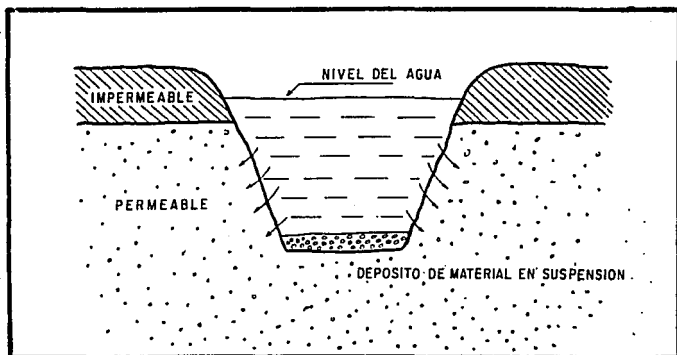
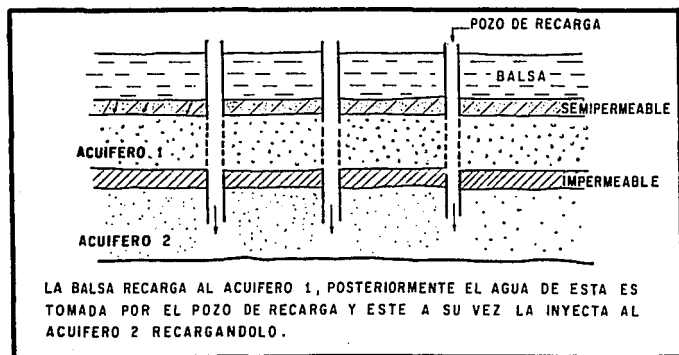


FIG. 5.15 RECARGA MEDIANTE FOSAS, (Referencia 3).



LA Balsa RECARGA AL ACUIFERO 1, POSTERIORMENTE EL AGUA DE ESTA ES TOMADA POR EL POZO DE RECARGA Y ESTE A SU VEZ LA INYECTA AL ACUIFERO 2 RECARGANDOLO.

FIG. 5.16 SISTEMA DE RECARGA MIXTO, (Referencia 3).

Consideraciones económicas. - Estas consideraciones consisten en llevar a cabo un análisis económico previo, para decidir si es costeable o no el proyecto de recarga y si se alcanzará a obtener los beneficios establecidos. Dichos beneficios pudiesen ser :

- Elevando los niveles del acuífero se evitan gastos por profundizar aún más el pozo y bajar la colocación de la bomba..

- Manteniendo las condiciones del acuífero se obtendrá como beneficio evitar gastos por abandono del pozo u otros gastos en recursos de otro tipo para evitar el asentamiento del terreno, o cualquier otro tipo de problema que se tenga que solucionar obteniendo un beneficio determinado a través de la recarga.

En cuanto a costos se refiere :

- Se deberán de considerar los costos que surgen desde el lugar de la toma de agua, el pretratamiento que requiera y su transporte hasta llegar a su objetivo, el costo que implique el bombeo a determinada profundidad (en el caso de recarga a profundidad). ligado a todo esto van los costos por planeación, construcción, operación y mantenimiento de toda la instalación de recarga (ya sea por sistemas en superficie o a profundidad).

Los costos anteriores son denominados directos, sin embargo no hay que olvidar a los costos indirectos puesto que estos también afectan a la economía del proyecto, como lo es la solución de problemas generados por los sistemas de recarga en superficie, como balsas y fosas, las cuales procrean infinidad de mosquitos con lo que se tiene que adquirir aditivos químicos especiales para su

eliminación, o mediante la compra de peces antimosquitos (*Gambusia affinis*). Además gastos que implica el control de otras plagas tales como ratas, malos olores, ruido de la maquinaria utilizada, etc..

Consideraciones Hidráulicas. - El caudal que se introduce hacia el acuífero a través del pozo por unidad de superficie se le denomina *ritmo de recarga* el cual está regido por lo siguiente:

- Permeabilidad y porosidad del material que constituye al acuífero.

- Capacidad de infiltración (m/día), características del espesor y permeabilidad del fondo y de las paredes laterales del sistema de recarga y la altura de agua libre disponible.

- Espesor saturado inicial.

- Tiempo y ritmo de recarga.

- Ritmo de colmatación del sistema de recarga.

- Profundidad del nivel freático inicial.

Consideraciones geológicas y locales. - Tomar en cuenta las incomodidades que causa la estancia de fosas y balsas para la recarga, para con las zonas habitadas que se encuentran cerca, debido a la acumulación de mosquitos como ya se citó anteriormente, a la vigilancia que hay que establecer para evitar accidentes, y a la construcción de vallas para evitar que la gente arroje basura hacia la fosa o balsa, son consideraciones que se clasifican como locales.

Otro tipo de consideraciones son las denominadas geológicas, dentro de las cuales se identifican las características que poseen los diferentes materiales que conforman al terreno en estudio, como son su textura, permeabilidad, granulometría, continuidad y discontinuidad de estratos, porosidad, barreras que obstaculizan el flujo de recarga, capacidad de almacenamiento del acuífero.

Consideraciones de calidad del agua. - Estas consideraciones son las que en determinado momento durante la operación de recarga pudiesen afectar a ésta, incrementando el proceso de colmatación, como lo es la turbidez, contenido de algas o de bacterias. También no se debe descartar lo que pudiese afectar la calidad del agua extraída del acuífero, como lo son las sales, las cuales pueden ocasionar daños en forma de precipitados alterando la composición del agua de recarga.

5.5.- SELLADO E IMPERMEABILIZACION POR CEMENTACION

5.5.1.- CONTROL DEL AGUA SUPERFICIAL, CUBIERTAS Y REVESTIMIENTOS

El control del agua superficial, el recubrimiento y los materiales impermeables son tres tecnologías distintas que son usualmente utilizadas en conjunción una con la otra. Las tres tecnologías sirven a propósitos distintos en la prevención de la contaminación de aguas subterráneas. Las medidas de control de aguas superficiales son diseñadas para minimizar la cantidad de agua superficial fluyendo sobre el lugar, reduciendo así la cantidad potencial de infiltración. El recubrimiento de un lugar es diseñado para minimizar la infiltración de cualquier agua superficial o de precipitación directa que ocurra sobre ese lugar. Los materiales impermeables proporcionan protección a las aguas subterráneas inhibiendo el flujo hacia abajo del lixiviado y/o atenuando contaminantes por procesos de absorción. Estas tecnologías son regularmente usadas como medidas preventivas, aunque el control de aguas superficiales y el recubrimiento han sido usadas exitosamente para disminuir problemas de contaminación de aguas subterráneas o también existen tecnologías para la colocación de revestimientos después que ha sido iniciada alguna actividad contaminante, generalmente estas involucran el uso de lechadas, que serán discutidas en la sección siguiente.

Las medidas de control de aguas superficiales representan un medio relativamente barato para minimizar problemas futuros de contaminación de aguas subterráneas, y como tal deberán de ser parte de cualquier diseño local; el flujo de agua superficial es minimizado facilmente usando técnicas de ingeniería civil, tales como zanja de saneamiento de un terreno y de drenaje. El diseño de un sitio utilizando recubrimientos superficiales y materiales impermeables, o ambos, está basado sobre un balance de agua para el lugar. En la FIG. 5.17 estan descritas las componentes de humedad de un lugar.

Hay cuatro combinaciones de recubrimiento y materiales impermeables que podrian ser usadas (en conjunción con las medidas de control de aguas superficiales) en un terreno de desperdicios, con estas combinaciones descritas en la FIG. 5.18. El primer tipo es llamado Lugar de atenuación natural y no utiliza recubrimiento, se basa completamente sobre la capacidad natural atenuante del suelo al contaminante. El segundo tipo de sistema utiliza un revestimiento impermeable para maximizar la cantidad de lixiviado recolectado y minimizar la cantidad de escape. Los lugares con cubierta impermeable son diseñados para minimizar la infiltración dentro de la fuente desperdicios, maximizando el flujo superficial continuo y la evapotranspiración. Los sitios con la combinación de cubiertas y revestimientos (total contención) son diseñados para minimizar la infiltración y maximizar el lixiviado recolectado, así se elimina el escape de cualquier lixiviado. Las ventajas y desventajas de cada tipo de sistema son bosquejadas en la tabla 5.14.

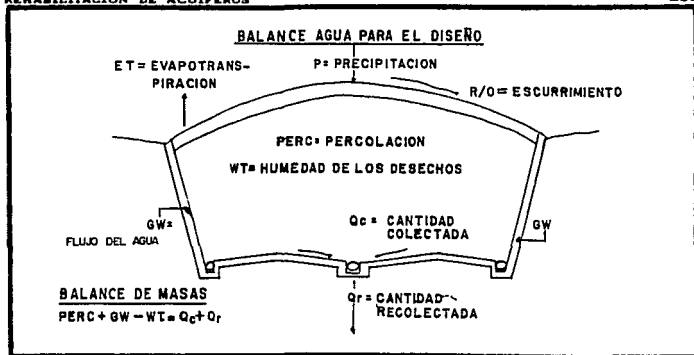


Figura 5.17 COMPONENTES DE HUMEDAD EN LOS DEPOSITOS PARA DESECHOS, (Referencia 9)

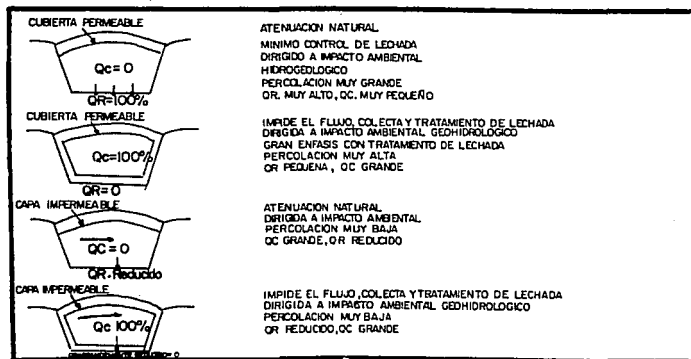


FIG. 5.18 COMBINACIONES DE RECUBRIMIENTO, (Referencia 9),

Tabla 5.14.- Ventajas y desventajas de cubiertas y revestimientos. (Referencia 9)

Sistema	Ventajas	Desventajas
Atenuación Natural	No hay recolección de lixiviado, transporte y costos de tratamiento.	Requiere escenarios hidrogeológicos únicos. Regularmente de difícil aceptación para obtener obligaciones a largos periodos.
Revestimientos	Disminución del impacto hidrogeológico. Rápida estabilización de desechos.	Efectos de abombamiento de arcillas. Incremento en costos de construcción. Cambios de superficies de descarga.
Cubiertas	Disminución del impacto hidrogeológico después de clausurar la obra. Reducción de costos de construcción relativo a revestimiento.	Incrementos en costos de clausura. No hay control del lixiviado durante las operaciones en el lugar. Largos periodos de monitoreo y cuidados de tierras superficiales.
Cubiertas y Revestimientos	Disminución del impacto ambiental. Minimiza la recolección de lixiviado post-clausura, transporte y costos de tratamiento. Políticamente y socialmente aceptable.	Altos costos por ingeniería y construcción. Necesita alta calidad de arcillas y materiales sintéticos Prolongados tiempos de estabilización de desechos.

-Construcción (recubrimientos superficiales).

En general los pasos involucrados en la construcción de un lugar con recubrimiento ingenieril incluye:

- 1.- Clausura de la instalación para recibir futuros materiales de desecho.
- 2.- Compactación del material de desecho y de colocación y funcionamiento de su base apropiada.
- 3.- Colocación de una cubierta impermeable (cápsula superficial).
- 4.- Colocación y funcionamiento del material apropiado sobre la cápsula.
- 5.- revegetación, y
- 6.- Reclasificación.

Los pasos claves involucrados en el encapsulado superficial son la colocación de la cubierta impermeable sobre la fuente de contaminación, y la revegetación y nivelación de el lugar. La nivelación del lugar deberá hacerse de manera que se maximice el flujo continuo superficial y se canalize más allá del lugar. La revegetación permite la evapotranspiración de agua que moja la cubierta del suelo, siendo diseñado el recubrimiento superficial para evitar cualquier infiltración de agua en los desechos y moverse hacia el agua subterránea. Las medidas adicionales que deberan ser incluidas en la mayoría de los lugares, incluye la instalación de agujeros para el gas e instalaciones de monitoreo tanto para flujo continuo de agua superficial como para flujo de agua subterránea.

Fung (1980) proporciona algunas recomendaciones generales para

colocar la capa superficial, suponiendo que está algún tipo de suelo o material trabajable desde el fondo hasta arriba. estas recomendaciones son:

- 1.- Hacer un estrato amortiguador abajo de la barrera (capa). gruesa y bastante densa para proporcionar una base estable y suave para compactar;
- 2.- Compactar todas las capas excepto la parte más alta del suelo y la parte más alta del amortiguador superior.
- 3.- Colocar una capa en valla esforzandose por el 90% de densidad de acuerdo a la prueba de compactación de 5 0 15 golpes de martillo.
- 4.- Cubrir con una capa de detención lo más pronto para evitar el secado intensivo.
- 5.- Proporcionar el suficiente espesor al diseño para asegurar el funcionamiento de la capa específica.
- 6.- Construir en unidades suficientemente pequeñas para permitir la terminación rápida.
- 7.- Considerar la contaminación del suelo superior al tiempo de esparcimiento.

Selección y consideraciones de diseño. - Los materiales utilizados para recubrimiento son muchos y variados. Fung (1980) agrupa a estos materiales en: suelos naturales, materiales de recubrimiento comercial y materiales de desecho. Tradicionalmente el suelo ha sido utilizado como material de recubrimiento en lugares de donación de desechos. El recubrimiento tiene que cumplir varias funciones, y la tabla 5.15

resume los tipos de suelo clasificados de acuerdo al sistema de unificado de clasificación de suelos (SUCS) en términos de varias funciones (Fung 1980). La clasificación de suelos realizada en la tabla 5.15 está basada en los siguientes puntos, con regimenes funcionales desde I (lo mejor) a tantos como XIII (lo más pobre). Donde quiera que sea disponible también son proporcionados los parámetros cuantitativos, de manera que puede verse la posición absoluta de un régimen de suelo particular (Fung 1980).

(1) La primera columna en la tabla 5.15 concierne al aspecto de traficabilidad. Los regimenes de I a XII de granos gruesos a suelos de turba fina están basados sobre el régimen de valores índices cónico (R.C.I.). El RCI expresa la resistencia probable del lugar específico bajo tráfico repetido. En la columna 2, la adhesividad a la traficalidad está basada en el peso porcentual de la arcilla en el suelo. La clasificación jerárquica para la lubricidad a la traficalidad en la columna 3 es similar a esa anterior columna aunque está basada sobre un parámetro distinto - arena y grava porcentual. La arena y la grava reducen la lubricidad, esto es, mejoran la calidad del suelo desde el punto de vista funcional, aumentando la resistencia friccional. Llama la atención el hecho de que todas las tres funciones de traficalidad proporcionan aproximadamente la misma clasificación jerárquica del suelo.

(2) La percolación del agua está consignada en la columna 4 y 5.

El mejor parámetro para juzgar es el coeficiente de permeabilidad k , aunque específicamente refleja el movimiento de agua en una

Tabla No E.1# (referencia #)

UICBS	Tipos de suelos	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
		Clasificación		Permeación del Agua Migración de Gas				
Simbolo		Humedad	Estuqueamiento	Impacte	Permite	Impacte	Permite	
		(Valor FCI)	(Arcillas, %)	(Arenas-Gravas, %)	(t/cm/s)	(t/cm/s)	(t/cm/s)	(t/cm/s)
GV	Gravas bien graduadas, mezcla de grava y arena con poco o nada de finos.	I (>200)	I (0-6)	I (95-100)	X (10)	II (10)	X (8)	I (8)
GP	Gravas mal graduadas, mezcla de grava y arena con poco o nada de finos.	I (>200)	I (0-6)	I (95-100)	XI (10)	I (10)	IX (8)	I (8)
GM	Gravas limosas, mezcla de grava y limo.	II (177)	II (0-20)	II (90-95)	VI (8X10)	VI (8X10)	VI (88)	IV (88)
GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcillas.	V (160)	VI (10-60)	V (90-95)	V (10)	VII (10)	IV (8)	VI (8)
GV	Arenas bien graduadas arena con grava, con poco o nada de finos.	I (>200)	II (0-10)	I (95-100)	IX (10)	IV (10)	VII (80)	II (80)
SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava con poco o nada de finos.	I (>200)	I (0-10)	I (95-100)	XI (8X10)	II (8X10)	VI (8)	IV (8)
GM	Arenas limosas, mezclas de arena y finos.	I (179)	IV (0-20)	IV (90-95)	VII (10)	V (10)	IV (112)	V (112)
SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcillas.	IV (167)	VII (10-60)	VI (90-95)	VI (8X10)	VII (8X10)	V (8)	VI (8)
ML	Limos inorgánicas, polvo de roca, limos arenosos o arcillas ligeramente plásticas.	IX (104)	V (0-20)	VII (0-60)	IV (10)	IX (10)	II (190)	VII (190)
CL	Arcillas inorgánicas de baja e media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	VI (111)	VII (10-60)	VII (0-60)	I (3X10)	XI (3X10)	II (190)	IX (190)
OL	Limos orgánicas y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	X (84)	V (0-20)	VII (10-60)	-	-	-	-
MH	Limos inorgánicas, limos micaceos o gastromicos, limos eslécticos.	VII (107)	IX (60-100)	IX (0-60)	II (10)	X (10)	-	-
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.	VI (145)	X (60-100)	X (0-60)	I (10)	XII (10)	I (200-400)	X (200-400)
OH	Arcillas orgánicas de media e alta plasticidad, limos orgánicas de media plasticidad.	XI (80)	-	-	-	-	-	-
PT	Turbas y otros suelos altamente orgánicas.	XI (48)	-	-	-	-	-	-

donde: I es coeficiente de permeabilidad. II No es la capilaridad.
 k-Factor es el factor de erosionabilidad del suelo
 Las clases del I al XI son del mejor hasta el más pobres
 en cuanto a la función de cubrir que se especifica.

FCI es el índice de la clase del cono.

Tabla No.6.16 (referencia 9)

UBCS	Tipo de suelo	(8)		(10)		(11)	(12)	(13)	(14)
		Control de la erosión		Reducción de la		Resistencia	Índice	Vegetación	
		Agua	Aire	congelamiento	sedimentación				agrícola
Símbolo		(t-Factor)	(Arena-Grava,%)	(-40,cm)	(silt, mm/día)	(Espesor)	Emergente	X	
GH	Gravas bien graduadas, mezcla de grava y arena con poco o nada de finos.	I (<0.05)	I (85-100)	X -	I (0.1-3)	I (9)	X -	X -	
GP	Gravas mal graduadas, mezcla de grava y arena con poco o nada de finos.	I -	I (85-100)	K -	I (0.1-5)	I (9)	X -	X -	
GM	Gravas limosas, mezcla de grava y fino.	IV -	II (80-85)	VI -	IV (0.4-4)	II -	VI -	VI -	
GC	Gravas arcillosas, mezcla de grava, arena y arcilla.	II -	V (50-80)	IV -	VI (1-8)	V -	V -	V -	
BV	Arenas bien graduadas arena con grava, con poco o nada de finos.	I (0.05)	I (85-100)	VII -	I (0.2-2)	I (9)	K -	K -	
BP	Arenas mal graduadas, arenas con grava con poco o nada de finos.	I -	I (85-100)	VI -	I (0.2-2)	I (9)	K -	K -	
GM	Arenas limosas, mezcla de arena y finos.	VI (0.13-0.27)	IV (80-85)	VI -	V (0.2-7)	I -	VI -	I -	
BC	Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla.	VI (0.14-0.27)	VI (50-80)	V -	VI (1-7)	IV -	IV -	I -	
ML	Limos inorgánicas, polvo de roca, limos arcillosos o arcillas ligeramente plásticas.	XII (0.80)	VI (0-80)	II -	X (5-27)	VI -	VI -	II -	
CL	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	XII (0.28-0.48)	VI (0-60)	I -	VI (1-6)	VII (1-10)	II -	VI -	
CL	Limos orgánicas y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	XI (0.21-0.29)	VI (0-80)	-	VII -	VI -	VI -	IV -	
MH	Limos inorgánicas, limos micáceos o distomocenos, limos silíceos.	X (0.25)	K (0.50)	-	K -	K -	I -	IV -	
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.	K (0.15-0.29)	X (0.50)	I -	II (0.8)	X (>10)	I -	VII -	
CH	Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicas de media plasticidad.	VII -	-	-	-	K -	-	VII -	
PT	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.	V (0.13)	-	-	-	-	-	II -	

condición saturada. Las clasificaciones jerárquicas en las columnas 4 y 5 son diametralmente opuestas, ya que una refleja la percolación retardada y la otra la mejorada.

(3) La migración del gas está considerada en las columnas 6 y 7 desde el punto de vista contrastante de flujo retardado y mejorado. El parámetro sobre el que la clasificación jerárquica está parcialmente basada, es el título de capilaridad (h_2) del suelo. Este parámetro refleja la tenacidad con la cual el suelo retiene el agua.

(4) Dos tipos de control de erosión se consideran en las columnas 8 y 9. Los suelos son valorados por la resistencia a la erosión del agua sobre la base de valores del factor K de la erosionabilidad del suelo USDA (k es el promedio de la pérdida del suelo en toneladas por acre por unidad de altura pluviométrica y escurrimiento del factor de erosividad R, donde R generalmente es igual al índice pertinente de altura pluviométrica que es precedida de datos meteorológicos. Para la resistencia a la erosión del viento, los suelos están valorados de acuerdo al contenido de arena y grava.

(5) Las columnas 10 y 11 conciernen a las funciones del recubrimiento para reducir la acción de las heladas. Los aspectos de heladas rápidas/deshielos rápidos, que involucran también la tendencia a congelar a profundidades mayores, dan la valorización del suelo de I a X basada sobre el título de capilaridad. La clasificación jerárquica para la resistencia a grietas involucra considerablemente un juicio. A pesar de esto, es bien conocido que el agrietamiento externo está restringido a suelos con un alto contenido de arcilla, y sólo esos

suelos valorados VIII o peores deberían de causar bastante preocupación.

(6) A fin de impedir la emergencia vectorial, se refiere un suelo con alto contenido de arcilla o la combinación graduada de arcilla, con o sin arena. Los suelos mantillosos, son algo más apropiados para sostener la vegetación que los suelos arenosos, en sedimento, y en extremo arcillosos de distribución de tamaño de grano. Así, una clasificación jerárquica en la columna 14, de suelos recubiertos, de sostener vegetación da las posiciones altas, algo subjetivamente, para mantillo y otras mezclas bien-graduadas. La clasificación jerárquica a la resistencia a incendios es la misma que para evitar la migración de gas en la columna 6, ya que la resistencia al flujo se aumenta si es evitado el movimiento de gas.

(7) Con el control del polvo, son esenciales para el polvo las partículas de grano fino, de modo que es considerado el parámetro jerárquico cuantitativo apropiado, ser la arena y el contenido de grava. Por lo tanto, la clasificación jerárquica es la misma para el control de erosión del viento.

(8) Los aspectos importantes de la cubierta vertiente lateral, son: la estabilidad, la filtración y el drenaje. Los aspectos de la filtración y el drenaje tiene valores idénticos en la valorización y clasificación jerárquica a esos, para evitar la percolación del agua y para asistir la percolación del agua, respectivamente. La estabilidad puede ser en muchos casos una función muy importante de la cubierta. En tales casos, la elección del suelo deberá considerarse y basarse

sobre pruebas del esfuerzo en el laboratorio.

(9) Se cree que la efectividad de los suelos para desalentar el horadamiento de animales aumenta porcentualmente con el contenido de arena. En consecuencia, la misma clasificación jerárquica es utilizada como fué usada para la traficabilidad resbaladiza, ya que ambos casos el parámetro importante es el contenido de grava y de tierra. Aparentemente el tipo de suelo no es una consideración pertinente en el desaliento de pájaros, así que ninguna preferencia es dada en la tabla 5.15.

(10) Para el uso futuro de largo alcance de un lugar de relleno para ambientes naturales o de parques, la clasificación jerárquica deberá ser la misma para sostener vegetación. Donde el uso futuro del vertedero público será para soportar pavimento o estructuras ligeras, un interés mayor es para módulos altos. Este aspecto de suelo cubierto es adecuadamente reflejado en los valores RCI en cuanto a la traficabilidad. Sin embargo, deberá recordarse que la capacidad resistiva del desecho sólido fundamental es comúnmente el factor crítico.

Los esfuerzos deberán ser encaminados, después de la selección del suelo para cubrir los desperdicios, al tratamiento y colocación más efectivo. La cubierta del suelo puede mejorarse en diversas formas a medida que es construida. Los materiales pueden ser agragados para una mayor graduación, el equipo de acarreo y de diseminación pueden operarse beneficiosamente, y la base o la estructura interna de la cubierta del sistema puede mejorarse. La mezcla del suelo aumenta el

costo de las operaciones de cubrimiento superficial y, por lo tanto, generalmente no ha sido debidamente considerado. Sin embargo, los beneficios derivados de la mezcla son algunas veces dramáticos a través de la alteración de la distribución del tamaño de grano o el promedio de grano. La mezcla puede ser hecha en el lugar usando una pala o rastrillador. Los ejemplos de materiales usados para mezclar incluye grava, arena, sedimento, y arcilla (Fung 1980).

También pueden mejorarse los suelos que son usados para cubrimiento superficial a través de la mezcla con aditivos y/o cementos. Los aditivos y los cementos están definidos como materiales sintéticos agregados en cantidades relativamente pequeñas al suelo para lograr efectos benéficos. Las clasificaciones incluyen cementos de refuerzo o estabilizadores, dispersantes, supresantes del punto de congelación, repelentes de agua, paliativos al polvo. Los factores que determinan el costo de la efectividad de aditivos y cementos son su costo unitario relativamente alto, forma de adición o incorporación, y duración del efecto. Un mayor interés en cualquier cubierta del sistema con resistencia aumentada es la susceptibilidad al agrietamiento como resultado del asentamiento diferencial o determinación ambiental, tal como el descongelamiento, los proyectos para generación de resanado son esenciales.

Tal vez la estratificación es la más promisoría, sin embargo dentro de poco inutilizado, la técnica para diseñar una cubierta final de desechos sólidos combinando dos o tres materiales distintos en capas, se puede movilizar las características favorables de cada uno

juntamente con pocos gastos extras. La FIG. 5.19 ilustra un sistema estratificado (Fung, 1980). Un sistema estratificado puede incluir la capa superficial del suelo, la capa impermeable, la capa amortiguadora, la capa de drenaje de agua, el filtro y la capa de drenaje de gas. Los comentarios de cada una de estas capas son:

1) Capa superficial del suelo.- Una capa superficial del suelo o subsuelo permite sostener la vegetación que frecuentemente forma la parte superior de un sistema de cubierta estratificada. Los subsuelos no tratados son rara vez adecuados directamente, así que con frecuencia ha sido necesario complementar al subsuelo con fertilizantes, acondicionadores, etc., para obtener el resultado deseado.

2) Capa impermeable.- Esta capa funciona para restringir el paso de agua o gas. Las capas barreras están casi siempre compuestas de suelo arcillosos que tiene inherentemente baja permeabilidad; SUCS tipos CH, CL y CS son ejemplos de tipos de suelos. Los suelos barrera son susceptibles a la deterioración por agrietamientos cuando se exponen a la superficie, de manera que se recomienda una capa amortiguadora para proteger la arcilla del excesivo secado. En lugar de suelos barrera pueden usarse membranas sintéticas. Los costos son generalmente altos en comparación a los suelos disponibles, y los problemas de colocación o de deterioro pueden surgir. Sin embargo, las membranas son una opción viable.

3) Capa amortiguadora.- Puede describirse como una capa aleatoria teniendo una función de cubierta y características subordinadas en

comparación con la capa subyacente. El servicio principal de un amortiguador es proteger una capa amortiguadora localizada arriba o abajo. El amortiguador protege a una barrera o lámina de arcilla delgada, vulnerable de rompimientos, agretamiento, desplazamiento, y perforaciones. Debajo de una barrera la capa amortiguadora también proporciona una base regular y suave. Cualquier tipo de suelo servirá como un amortiguador, pero deberá estar libre de terrones.

4) La capa o canal de drenaje del agua. Puede diseñarse una capa de drenaje de agua o canal dentro de la cubierta en numerosas formas para proporcionar una trayectoria para que el agua salga rápidamente. Las posibilidades como materiales efectivos de drenaje son la grava y la arena pobremente graduadas, esto es, suelos clasificados como GP y SP.

5) Filtro.- Donde son unidas las capas con tamaños de granos enormemente discordantes, puede haber una tendencia para las partículas finas a penetrar la capa gruesa. Como resultado la efectividad de la capa gruesa para el desagüe puede ser reducido obstruyendo los poros. La eliminación de la capa fina puede estimular efectos malos adicionales, tales como erosión interna y sedimentación. Una capa filtro con un material tal como sedimento puede ser deseable.

6) Capa de drenaje de gas y respiradores.- Una capa de drenaje de gas tiene una consistencia y configuración similar a esos de la capa o canal de drenaje de agua. Ambos tipos de capa funcionan para transmitir preferencialmente. La posición en el sistema de la cubierta es la principal distinción. La capa del drenaje de gas es puesta sobre

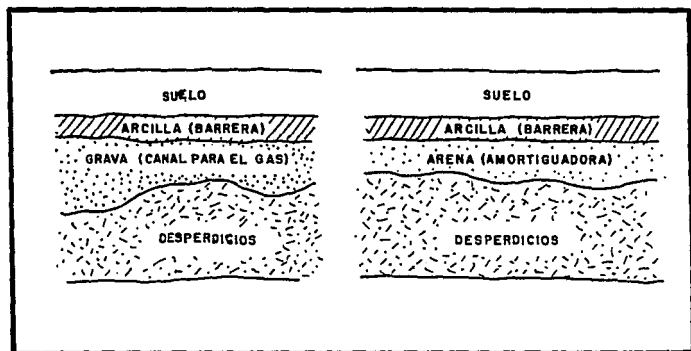


FIG. 5.19 SISTEMAS TÍPICOS DE CAPAS DE CUBIERTAS
(Referencia 9).

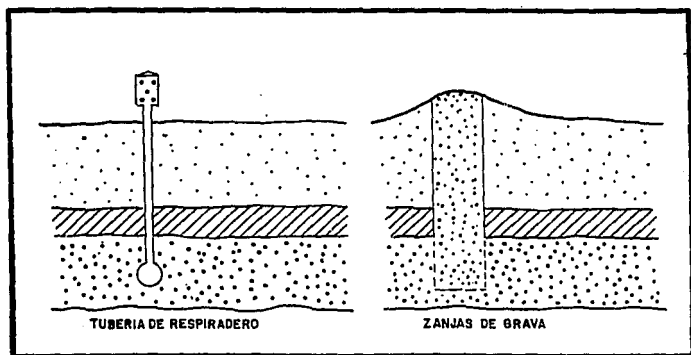


FIG 5.20 DOS TIPOS DE RESPIRADEROS DE GAS PARA SISTEMAS DE CUBIERTA, (Referencia 9).

el lado inferior para interceptar los gases que suben las celdas de desecho, mientras que el drenaje para el agua es colocado sobre el lado superior para interceptar el agua percolandose desde la superficie. frecuentemente los respiradores de gas son usados en el estado actual en vertederos públicos municipales. Se ha encontrado que si no se ventilan apropiadamente a la atmósfera pueden acumularse concentraciones peligrosas de gases inflamables. La FIG. 5.20 ilustra dos tipos de respiradores de gas recomendables.

Los materiales de recubrimiento o membranas comercialmente disponibles pueden ser preferibles a los sistemas basados en suelos sobre desperdicios que poseen un alto riesgo de una seria contaminación. Los ejemplos de materiales comerciales incluyen bituminoso y barreras de concreto de cemento portland, y membranas de varios tipos funcionando solas o conjuntamente con el suelo o capas granulares de desechos para excluir el agua. Un número de materiales comerciales y sus características se presentan en otra fuente (Fung, 1980). Un número de factores deberá ser considerado en la selección de un material comercial de recubrimiento. Las características importantes de las membranas flexibles y las barreras rígidas incluyen la vulnerabilidad al rompimiento o al agrietamiento, respectivamente. Un amortiguador solo de arena deberá reducir la perforación de la membrana durante la construcción, pero el proyecto a largo plazo será necesario contra efectos de tensión de sedimentación diferencial. Algunas veces la barreras rígidas tiene una ventaja ya que las fisuras pueden ser expuestas, limpiadas y reparadas (selladas con alquitran)

con relativa facilidad. El deterioro es otro problema mayor de consideración seria. Las barreras de concreto son susceptibles al deterioro químico en ambientes asperos tales como esos ricos en sulfato.

La luz del sol, el horadamiento de los animales, y las raices de las plantas aumentan el deterioro de las membranas. 20 años es casi la extensión de la experiencia con membranas. Diseños más largos de servicio pueden ser algo riesgosos en condiciones o ambientes adversos.

La otra categoría de materiales sin suelo que esta disponible para cubierta de desechos fluctua a través de una lista larga y diversa de desechos granulares (algunos son de hecho suelos). Una ventaja económica puede originarse de usar estos desechos baratos localmente generados en lugar de suelos naturales y escasos. Los ejemplos de materiales de desecho usados para cubierta incluyen polvillo de cenizas, polvillo de cenizas modificado con caliza para realizar la cementación, cenizas y escoria de fondo, escoria de horno (de acero inoxidable), residuos de incinerador, arena de fundición, desechos de minas y pozos, lodo (cieno) de plata, sedimento de canales y depósitos, material degradado y lodo compuesto de aguas cloacales.

5.5.2.- LAMINAS PILOTEADAS

Las láminas piloteadas implica encajar dentro del suelo largas láminas de acero conectadas al mismo tiempo para formar una barrera permanente e impermeable al flujo. Los materiales también pueden incluir madera y concreto; sin embargo, sus aplicaciones para situaciones de agua subterránea contaminada serían dudosas a la corrosión y costos respectivamente.

Construcción.- El piloteo de láminas requiere que las secciones de acero sean ensambladas antes de ser empujadas dentro del suelo. Las láminas de acero tienen conexiones a lo largo de ambos bordes. Las conexiones pueden ser de ranuras o tipo de bola y enchufe. Entonces las secciones son empujadas individualmente dentro del suelo utilizando un martillo de piloteo. Los tipos de martillos pueden ser: percusión, vibratorio, simple-acción a vapor, doble-acción a vapor, de diesel, e hidráulico. Para cada tipo de martillo listado la energía empulsadora es suministrada por la caída de alguna masa, con la cual golpea la parte superior del pilote. Después los pilotes tienen que ser empujados a la profundidad deseada, las partes sobresalientes son cortadas. Inicialmente las láminas piloteadas no son totalmente impermeables debido a pequeñas aberturas en las conexiones. A medida que transcurre el tiempo, estas aberturas son cerradas, como el flujo del agua subterránea acarrea finas partículas dentro de las aberturas y entonces cierra por obstrucción.

Las láminas de acero piloteadas pueden ser consideradas permanentes porque la experiencia muestra que la corrosión no es un factor en la causa de fracasos. Una fuerte ventaja de las láminas piloteadas es que las secciones son reutilizables y no tienen que ser abandonadas permanentemente. Si las condiciones lo permiten, los pilotes de acero pueden ser removidos y reutilizados.

Ventajas y desventajas. - La construcción de láminas de acero piloteadas como una manera de control del agua subterránea puede ser parcialmente efectivo y económico en casos específicos. En el incremento del tamaño de un proyecto de láminas piloteadas se vuelve anti-económico debido al alto costo del material y laminado. En adición, el empuje de pilotes requiere un suelo uniforme relativamente y libre de rocas para la facilidad de la construcción. Otras ventajas y desventajas son listadas en la tabla 5.16.

Tabla 5.16.- Ventajas y Desventajas de laminas de acero piloteadas. (Referencia 9)

Ventajas	Desventajas
1) La construcción no es dificultosa; la excavación no es necesaria.	1) En láminas de acero piloteadas inicialmente no es perfecto el cierre.
2) Contratistas, equipo y materiales son disponibles.	2) Es dificultoso el empuje de los pilotes a través de suelos rocosos.
3) La construcción puede ser económica.	3) Ciertos químicos pueden atacar al acero.
4) Después no requiere mantenimiento.	
5) El acero puede ser recubierto para protección de la corrosión.	

5.5.3.- CEMENTACION

Cementación.- Es el proceso de inyección de un líquido, ya sea una suspensión o una emulsión bajo presión en el suelo. El fluido inyectado correra desde el punto de inyección hasta ocupar los espacios porosos disponibles. Al paso del tiempo, el fluido inyectado solidificará, resultando así un decremento en la permeabilidad original del suelo y un incremento en la capacidad de soporte del suelo. Las cementaciones son clasificadas comúnmente en químicas o de partículas. Estas últimas están constituidos por agua más material de partículas que solidificarán dentro de la matriz del suelo. Las

lechadas químicas están hechas normalmente de dos o más líquidos que gelificarán cuando se pongan en contacto unos con otros. Listadas en la tabla 5.17 están los materiales comúnmente utilizados en la elaboración de las lechadas. La tabla 5.18 identifica las propiedades de los aditivos del cemento de las lechadas.

Tabla 5.17.- Materiales comúnmente utilizados en la cementación.
(Referencia 9)

Cemento, agua	asfalto
Cemento, polvo de roca, agua	arcilla, agua
Cemento, arcilla, agua	químicos
Cemento, arcilla, arena, agua	

Tabla 5.18.- Propiedades de los activos del cemento de las lechadas. (Referencia 9)

Aditivo	Propiedad
Cloruro de calcio Hidróxido de sodio Silicato de sodio	Aceleradores del tiempo de fraguado
Sulfato de calcio Cal dulce Compuesto de sodio	Retardadores del tiempo de fraguado
Granos finos de bentonita	Incrementa plasticidad Reduce la contracción de la lechada
Arcilla Lutita Polvo de roca	Reduce costos de la lechada Reduce la resistencia de la lechada

Construcción. - Dos de los más populares métodos de instalación de cementaciones son: el método de fase y el método del empacador. En el primero los agujeros se perforan hasta la zona geológica inmediata a la superficie del suelo y se inyecta el fluido de la cementación (lechada). Entonces se limpian los agujeros perforando continuamente hasta la zona siguiente, continuando también la cementación. El proceso se repite hasta que se haya obtenido una profundidad suficiente. En general el método de fase procede de manera descendente utilizando el incremento en las presiones de inyección. En el método de empacador los agujeros se perforan hasta la profundidad máxima supuesta. Una zona de densidades específicas se fracciona entonces colocando empacadores hasta la altura y profundidades tope de la zona. Se inyecta así la lechada a la zona siguiente para ser cementado y se repite el proceso. El método del empacador se mueve hacia arriba desde la profundidad utilizando el decremento en las presiones de inyección. Las ventajas del método del empacador incluyen las presiones de cementación pueden ajustarse específicamente hasta una profundidad particular inicial; las paredes de los agujeros perforados quedan lisas y selladas excelentemente por los empacadores; están prohibidas manejar altas presiones en el método de fase, pues se puede causar fractura. Sin embargo, estas ventajas pueden ser compensadas por altas necesidades de equipo y tiempo de instalación (Bowen, 1981).

Otro método de inyección de lechada es el de presión (Golpeo de varilla). En éste, una varilla perforada se impulsa hacia la profundidad deseada y la lechada se inyecta al tiempo en que la

varilla se hace descender lentamente. Este método esta limitado a profundidades someras y suelos relativamente libres de cantos rodados.

Se pueden crear problemas durante la construcción de sistemas de lechadas, incluidos:

Escurrimiento de lechada alrededor de la pipa de inyección, del agujero que este siendo cementado; si existe pérdida de presión por debajo del nivel del agua, se arena forzando al agua a entrar a la pipa; y el revestimiento de las lechadas en áreas circunvecinas debido a la migración lateral. Es también aconsejable depositar lechadas de cemento en fronteras (zonas) a partir de las cuales toda la arcilla, o material no consolidado se haya removido, así se añade la carga lavando los agujeros perforados.

La construcción de las paredes de corte de lechada requieren de cierto equipo en adición al agujero perforado normal o equipo de perforación. La lista incluye: uno o más compresoras de aire, uno o más mezcladores de lechada; un agitador tipo, tanque de reserva; una o más bombas de lechada y pipas o mangueras de descarga de lechadas, válvulas y calibradores de presión.

Diseño. - La primera consideración en el diseño de un sistema de lechada de corte es la composición actual de la lechada, la composición será una función de distintas variables incluyendo: el tipo de suelo a ser inyectado; el contaminante a inhibir; el tiempo de la contaminación, el tiempo para la instalación. En general, las lechadas químicas deben de realizarse en suelos fino-granulares. Sin

embargo las lechadas químicas comúnmente silicatos, no son convenientes por los ambientes altamente ácidos o alcalinos debido a que la formación de sus geles es una reacción- ácido - base. Para suelos de cuarzo o grava, son recomendables las lechadas de partículas. La cantidad de cemento o bentonita en una lechada de partículas varía grandemente. La cantidad de bentonita que puede ser incorporada en una lechada depende de las siguientes consideraciones:

La viabilidad de la mezcla.- Las concentraciones de bentonita incrementan la consistencia de la lechada pudiendo no llegar a ser susceptible de bombeo; la adición de bentonita a las lechadas de cemento disminuyen su fuerza compresiva; el rendimiento en las elevadas concentraciones de bentonita, baja la gravedad específica de las lechadas, mostrando una reducida tendencia a migrar a través del suelo después de ser colocadas; y las elevadas concentraciones de bentonita reducen el establecimiento o sedimentación de las lechadas antes de la inyección.

Una guía general para la selección de las lechadas se muestra en la FIG. 5.21. El conocimiento del tipo de suelo en el área a proteger, FIG. 5.21, puede iniciar a partir de determinar tanto los tipos de lechadas aplicables como los procedimientos viables de cementación. El rango de los tipos de suelo para los cuales un procedimiento particular de lechada es aplicable queda indicado por el cruzamiento de las barras. Las tablas 5.19 a 5.21 resumen la compatibilidad de las lechadas con distintos tipos de contaminantes.

La segunda consideración para el diseño, es la presión a la cual

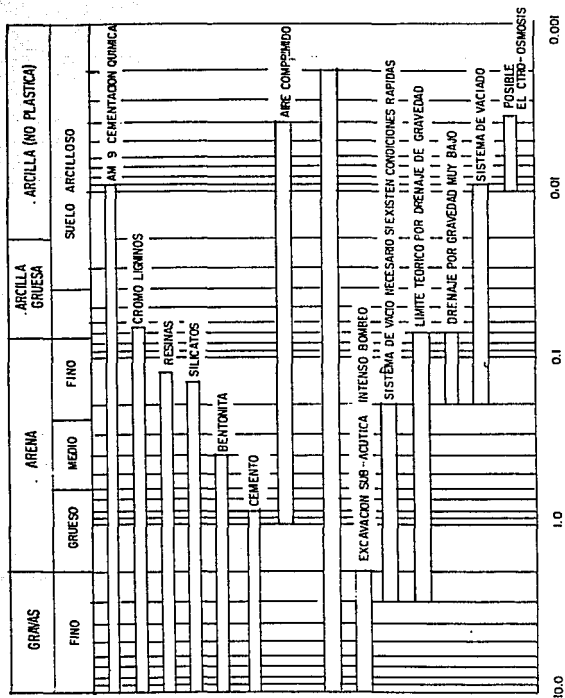


FIG. 5.2) LIMITES DE GRADUACION DEL SUELO PARA INYECCION DE CEMENTO₁ (Referencia 9).

TABLA 5.19 (Referencia 9)

GRUPO QUIMICO	TIPO DE MATERIAL PARA LA CUBIERTA											
	CEMENTO PORTLAND					POLIMEROS						
	BITUMEN	TIPO I	TIPO II Y V	ARCILLA (BENTONITA)	ARCILLA-CEMENTO	SILICATOS	ACRILAMIDA	FENOLES	URETANO	UREA-FORMALDEHIDOS	EPOXIDOS	POLIESTER
ACIDO	7a	1d	1d	7c	7c	3a	2c	7a _ç	2c	1a	7a _ç	7d
BASES	7a	1d	1a+	7c*	7d	2c	3d	7d	7d	2c	7a	7d
METALES PESADOS	7	1a	7	7d	7	37	37	7	7	7	7	7
SOLVENTES NO POLARES	7d	2c	27	7d	7	7	7a	7d	7a	27	7d	7d
SOLVENTES POLARES	7d	2c	27	7d	7	7	7	7d	7a	27	7d	7d
SALES INORGANICAS	7d	2c	2a	2d	7d*	37	3d++	3a	7d	7a	7a	7

CLAVE:

INDICE DE COMPATIBILIDAD
EFECTOS SOBRE PERIODOS DE
TIEMPO.

- 1 SIN EFECTO
- 2 INCREMENTOS EN PERIODOS DE TIEMPO (PROLONGAR O PREVENIR EL ENDURECIMIENTO).
- 3 DECREMENTOS EN EL PERIODO DE TIEMPO

EFECTO DE DURABILIDAD

- a EFECTO NO SIGNIFICATIVO
- b INCREMENTO DE DURABILIDAD
- c DECREMENTO DE DURABILIDAD (ACCION DESTRUCTIVA EN CORTO TIEMPO).
- d DECREMENTO DE DURABILIDAD (ACCION DESTRUCTIVA EN UN TIEMPO LARGO).

- * EXCEPTO SULFATO, LOS CUALES SON 7c
- + EXCEPTO KOH Y NaOH, LOS CUALES SON 1d
- ++ EXCEPTO SALES DE METALES PESADOS, LOS CUALES SON 2
- ç NO OXIDANTE
- ** BENTONITA MODIFICADA ES d
- 7 DATO NO DISPONIBLE

TABLA 5.20 (Referencia 9)

GRUPO QUÍMICO	TIPO DE MATERIAL PARA LA CURRERIA											
	CEMENTO PORTLAND					POLÍMEROS						
	BITUMEN	TIPO I	TIPO II Y V	ARCILLA (BENTONITA)	ARCILLA-CE- MENTO	SILICATOS	ACRILAMIDA I	FENOLES	URETANO	UREA- FORMALDEÍDO	EPOXIDOS	POLIÉSTER
COMPONENTES ORGÁNICOS												
ALCOHOLES Y GLICÓLES	7a	7d	7d	7d	7d	7	7d	7	3b	7	7a	7a
ALDEHIDOS Y KETONES	7d†	7	7	7d	7	7	7a	7a	7d	7	7	7
HIDROCARBUROS ALFA- TICOS Y AROMÁTICOS	7d	2a	2†	7d	7	7	7b	7d†+	7a	2a	7d	7d
AMIDAS Y AMINAS	7	7	7	7	7	7	7	7	3†	7	7	7
HIDROCARBUROS CLORO- NATADOS	7d	2d	2d	7	7	7	7a	7d	7a	2a	7d	7d
ÉTERES Y EPOXIDOS	7	7	7	7	7	7	7a	7	7a	7d	7	7
HETEROCICLOS	7	7	7	7d	7	7	7b	7	7	7	7	7
NITRITOS	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
ÁCIDOS ORGÁNICOS Y ORGANOMETÁLICOS	7a	1d	1d	7d	7d	7a	2a	7a	2a	1a	7d	7d
FENOLES	7d	1	7	7d	7d	7	7	7	2a	2c	7	7
ÉSTERES ORGÁNICOS	7	7	7	7	7	1a	7	7	7	7	7	7
COMPONENTES INORGÁNICOS												
METALES Y SALES Y COM- PLEJOS	7d	2c	2a	7d	2c	3†	2†	7	7	7a	7	7
ÁCIDOS INORGÁNICOS	7a†	1d	1a	7c**	7c	3a	2c	7b†	2c	1d	7b†	7a
ÁCIDOS BASES	7a	1a	1a†	7c**	7d	2c	3d	7d	7d	2c	7a	7d
SALES INORGÁNICAS	7d	2c	2a	2d	7d*	3†	3d	7a*	7d	7a	7a	7a

CLAVE:

INDICE DE COMPATIBILIDAD
EFECTOS SOBRE PERIODOS DE
TIEMPO.

- 1 SIN EFECTO
- 2 INCREMENTOS EN PERIODOS
DE TIEMPO (PROLONGADO
PREVENIR EL ENDURECIMI-
ENTO).
- 3 DECREMENTOS EN EL PERIO-
DO DE TIEMPO

EFECTO DE DURABILIDAD

- a EFECTO NO SIGNIFICATIVO
- b INCREMENTO DE DURABILIDAD
- c DECREMENTO DE DURABILIDAD
(ACCIÓN DESTRUCTIVA EN COR-
TO TIEMPO).
- d DECREMENTO DE DURABILIDAD
(ACCIÓN DESTRUCTIVA EN UN
LARGO TIEMPO).

- * EXCEPTO SULFATO, LOS CUALES SON 7c
- † EXCEPTO KOH Y NaOH, LOS CUALES SON 1d
- ‡ SOLO POLÍMEROS DE BAJO PESO MOLECULAR
- § NO OXIDANTE
- ¶ NO OXIDANTES, EXCEPTO HF
- ** EXCEPTO CONCENTRACIONES ACIDAS
- *** EXCEPTO ALIADOS LOS CUALES SON 1a
- †† EXCEPTO QUE SON 3d

** BENTONITA MODIFICADA ES 7d
†† DATO NO DISPONIBLE

TABLA 5.21 (Referencia 9)

GRUPO QUIMICO	TIPO DE CUBIERTA						
	POLIMEROS						
	SILICATOS	ACRILAMIDA	FENOLES	URETANO	UREA-FORMALDEIDOS	EPOXIDOS	POLIESTER
COMPONENTES ORGANICOS							
ALCOHOLES Y GLICOLAS	1a	1-	3b	-	1	1-	1-
ALDEIDOS Y KETONES	1a	-	-	1a	-	1a	1a
HIDROCARBUROS ALIFATICOS Y AROMATICOS	1d	1-	-	1-	-	1-	1-
AMIDAS Y AMINAS	3a	3d	3b	a	1a	1a	3a
HIDROCARBUROS CLORINATADOS	1a	1-	1a	1-	-	1a	1a
ETERES Y EPOXIDOS	1a	1-	1a	1-	-	1a	1a
HETEROCICLICOS	1d	1-	1a	1a	1a	1a	1a
NITRITOS	1a	3-	1a	1a	1a	1a	1a
ACIDOS ORGANICOS Y ACIDOS CLORIDOS	1-	-	3-	2-	-	-	1-
ORGANOMETALICOS	1a	3a	-	-	1a	1a	3+?
FENOLES	1a	1a	-	2-	1a	1a	1?
ESTERES ORGANICOS	-	?	?	?	?	?	1d
COMPONENTES INORGANICOS							
METALES PESADOS Y COMPUESTOS							
PLUMBOS	a	-	-	-	-	3-	3?
ACIDOS INORGANICOS	-	-	2-	-	-	1-	1-
ACIDOS BASES	-	-	3-	-	-	-	1-
SALES INORGANICAS	d	-	-	-	-	-	3?

CLAVE:

INDICE DE COMPATIBILIDAD
EFECTOS SOBRE PERIODOS DE TIEMPO

- 1 SIN EFECTO
2 INCREMENTOS EN PERIODOS DE TIEMPO (PROLONGAR O PREVENIR EL ENDURECIMIENTO).
3 DECREMENTOS EN EL PERIODO DE TIEMPO.

EFECTO DE DURABILIDAD

- a EFECTO NO SIGNIFICATIVO
b INCREMENTO DE DURABILIDAD
c DECREMENTO DE DURABILIDAD (ACCION DESTRUCTIVA EN CORTO TIEMPO).
d DECREMENTO DE DURABILIDAD (ACCION DESTRUCTIVA EN UN LARGO TIEMPO).

- * SI LAS SALES DE LOS METALES SON ACELERADAS.
+ SI EL METAL ES CAPAZ DE ACCIONAR COMO UN ACELERADOR.
? DATO NO DISPONIBLE

la lechada queda inyectada. El uso de presiones excesivas puede debilitar el estrato por fractura de la roca o por fisuras en otras rocas cercanas. "Las fisuras inducidas por presión" darán como resultado las pérdidas de la lechada. En contraste, la presión debería ser lo suficientemente alta para asegurar la penetración de la lechada y disminuir el tiempo requerido para la cementación. La presión permisible para la cementación será la mejor si se determina por las pruebas de fractura hidráulicas en el estrato a cementar.

Un buen número de agentes químicos en las lechadas, han sido prohibidos o discontinuado su uso debido a su toxicidad Huibregtse y Kastman (1981). Hacen notar que una de las exitosas lechadas, la AM-9, es altamente tóxica y ha sido eliminada de la mayoría de los mercados debido a sus indeseables efectos potenciales en el agua subterránea. Otra de las lechadas consideradas como tóxicas y que presentan cierto potencial de contaminación son las lechadas Lignin- y formaldehído-base.

Ventajas y Desventajas. - La tecnología de cementación ha sido utilizada por años en la industria de la construcción. A la fecha la mayoría de sus aplicaciones se ha extendido hacia el recubrimiento de los pozos (para auxiliar en la cementación de pozos) y para disminuir la permeabilidad de un suelo impidiendo el movimiento del agua (tal como detiene una pared a una presa). Son muy recientes las aplicaciones de esta tecnología en el control de la contaminación del agua subterránea. Por ejemplo Huibregtse y Kastman (1981) han analizado la factibilidad del transporte de las unidades de

cementación para proteger el agua subterránea amenazada de peligrosos derrames sobre la superficie del suelo. Un buen número de ventajas y de desventajas físico-químicas se enlistan en la tabla 5.22.

Tabla 5.22.- Ventajas y Desventajas de los sistemas de cementación. (Referencia 9)

Ventajas	Desventajas
<p>1) Las cementaciones pueden ser exitosas cuando son diseñadas sobre la base de minuciosas investigaciones preliminares.</p> <p>2) Las cementaciones han sido utilizadas por más de 100 años en construcción y proyectos de estabilización de suelos.</p> <p>3) Muchos tipos de cementación puede adaptarse a distintos tipos de suelo viables en un amplio rango.</p>	<p>1) La cementación es limitada a tipos de suelos granulares que tienen poros de gran tamaño suficiente para aceptar los fluidos de las lechadas a presión baja para prevenir la migración significativa de un contaminante antes de la implantación de la lechada.</p> <p>2) La cementación en un suelo con muchas capas puede generar una cubierta incompleta de lechada.</p> <p>3) La presencia de grandes bancos de agua y flujo rápidos de agua subterránea limita la cementación a través de:</p> <p>a) Extenso transporte de contaminantes.</p> <p>b) Rápida disolución de las lechadas.</p> <p>4) El procedimiento requiere de la planeación y preevaluación cuidadosa. Los métodos de aseguramiento no son fácilmente disponibles para determinar si efectivamente todos los poros de la pared hayan sido cementados.</p>

5.5.4.- PAREDES IMPERMEABLES

Este método de restauración consiste principalmente en el encapsulamiento del área afectada por medio de paredes con material impermeable, que generalmente consiste en la mezcla de arcilla y agua, para prevenir la contaminación del agua subterránea o restringir el movimiento del contaminante. El método incluye la excavación de una zanja alrededor del área afectada y posteriormente el relleno con un material impermeable.

Pueden ser situadas gradiente arriba del lugar de desechos para prevenir que el flujo del agua subterránea atravesase al área peligrosa (FIG. 5.22), o bien situados alrededor del lugar (FIG. 5.23) para evitar el movimiento del agua - contaminante. Usualmente este método requiere de otras actividades tales como una cubierta superficial impermeable o pozos de extracción.

Construcción. - El método más común en la construcción de las paredes impermeables, es el método de la zanja. En este método se excava una zanja a la profundidad deseada, dependiendo de la profundidad del contaminante. Después de la excavación, la zanja puede ser solidificada mediante la mezcla de bentonita, agua y material impermeable, o puede solidificar por la incorporación de cemento a la mezcla. Las zanjas de relleno pueden ser de: Suelo-Bentonita (S-B) y Cemento-Bentonita (C-B). La tabla 5.23 muestra las ventajas de cada tipo de zanjas (Ryan, 1980).

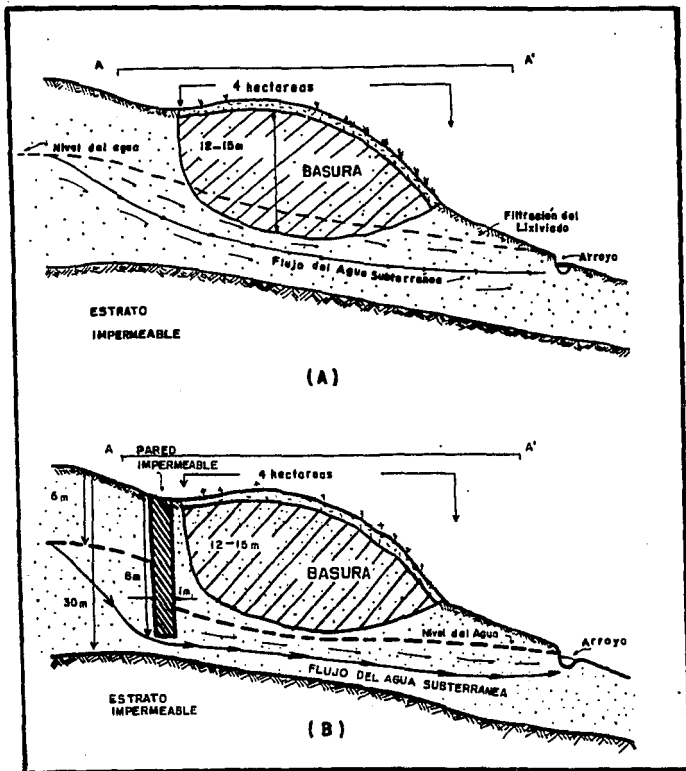


FIG 5.22

SECCION TRANSVERSAL DE UN BASURERO

A) ANTES DE INSTALAR LA PARED IMPERMEABLE

B) DESPUES DE INSTALAR LA PARED IMPERMEABLE

(Referencia 9).

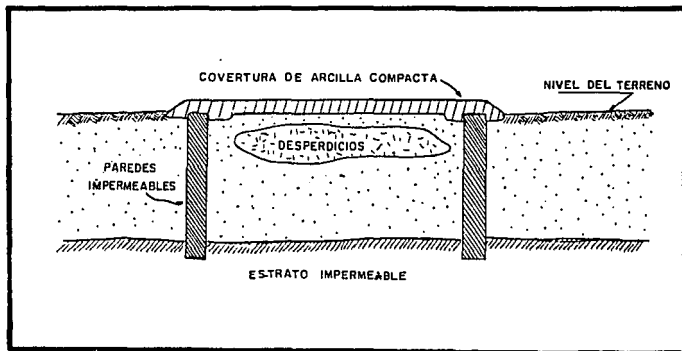


FIG. 5.23 AISLAMIENTO DE LA EXISTENCIA DE DESPERDICIOS ENTERRADOS, (Referencia 9).

Otro método empleado en la construcción de las paredes impermeables, es el de la "viga vibradora", el cual consiste en introducir una mangera a presión en el subsuelo con la consecuente inyección de la mezcla bajo una presión. La viga es extraída gradualmente conforme se inyecta.

Esté método es similar al de la "Lechada" y las ventajas y desventajas son semejantes. Puede ser más económico que el método de la zanja, sin embargo la continuidad de la pared no puede ser garantizada, el espesor de la pared es considerablemente más pequeño, y la presencia de cantos rodados en el subsuelo impiden la ejecución del método.

Tabla 5.23.- Comparación de las zanjas C-B y S-B (Referencia 9)

CEMENTO - BENTONITA	SUELO - BENTONITA
1) Es independiente de la calidad y cantidad del suelo de relleno. 2) Conveniente para áreas de acceso limitado. 3) Rápida colocación del cemento. 4) Se puede construir en secciones. La S-B requiere zanjas continuas en una construcción.	1) Bajo costo del material. 2) Puede lograr mayor permeabilidad que las zanjas C-B.

La construcción de las zanjas para la mezcla es generalmente simple y consiste esencialmente de la excavación, recirculación de la mezcla, y el consecuente relleno del material. La excavación puede realizarse por: backhoe, draglines, clamshell, bucket scrapers, o equipo de perforación rotatorio. La selección del tipo específico de equipo de excavación es generalmente gobernado por la profundidad y el ancho de la zanja.

El "Backhoe" se utiliza cuando la profundidad que se requiere es poco profunda (< 30 m), para profundidades mayores de 30 m es recomendable utilizar los "Draglines". Los "Clamshells" y los "Bucket Screper" se utilizan para zanjas profundas (Ryan, 1980).

La recirculación de la mezcla es importante para mantener la integridad de la misma. Durante la excavación la mezcla será sujeto a

pérdidas por infiltración y cambios en la densidad por adición de material excavado. El control de estas variaciones se logra por la recirculación continua de la mezcla la cual se hace pasar por un separador que divide la mezcla de material excavado. Las operaciones de relleno pueden requerir mezclas de diferentes tipos de suelos.

Un aspecto importante en la construcción de las zanjas, para las paredes impermeables, es la abertura dentro de la zona impermeable. Cuando se trata de materiales arcillosos las zanjas requerirán de 2 a 3 pie de abertura.

Diseño. - La consideración importante para el diseño de las paredes impermeables es la composición de la mezcla y el resultado de la impermeabilidad de la pared.

Las viscosidades de las mezcla del tipo C-B y S-B deben ser de 40 a 50 sec. (embudo Marsh) y además es recomendable que la densidad especifica sea de 15 lb/ft³ menor que el peso unitario del material de relleno (suelo) y de la cantidad de bentonita a mezclar. Estas características se muestran en las FIG. 5.24 y 5.25.

La consistencia ideal para la colocación del material de relleno es una pasta que tenga un contenido en agua escasamente por arriba del límite de líquido de la mezcla de arena-arcilla-bentonita.

La durabilidad de las paredes se refiere a la resistencia al ataque de contaminantes. En la presencia de agua limpia, con paredes de C-B y S-B, se presenta baja deterioración y puede considerarse permanente. sin embargo, la pared del tipo C-B muestra poco

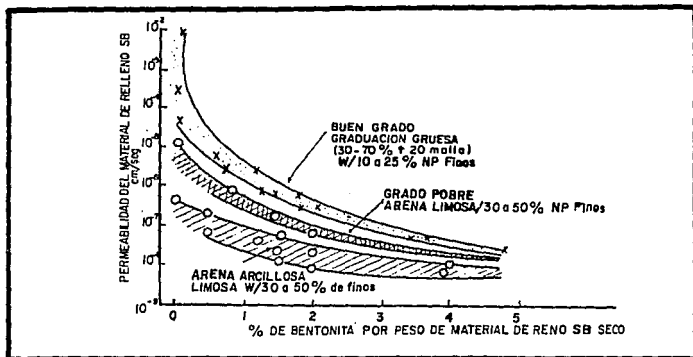


FIG. 5.24 RELACION ENTRE LA PERMEABILIDAD Y CANTIDAD DE BENTONITA ADERIDA AL SB

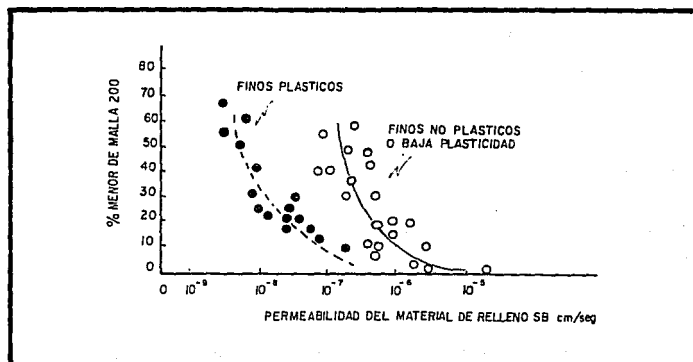


FIG. 5.25 PERMEABILIDAD DEL MATERIAL DE RELLENO SB RELACIONADO A LOS FINOS CONTENIDOS.

funcionamiento con la presencia de ácidos o sulfatos. Igualmente, la exposición de la S-B a ciertos contaminantes puede conducir al incremento de su permeabilidad a través de la disolución del material, como resultado a la alta concentración de sales, que atraen el agua por hidratación, o puede resultar de la substitución ionica dentro de la matriz de arcilla. La permeabilidad de las paredes S-B muestra un incremento con la presencia de ciertos organismos: calcio, magnesio, metales pesados y soluciones de alta fuerza ionica.

Xanthakos (1979) sugiere que los sistemas de paredes impermeables deben ser diseñados de acuerdo a las funciones que estos proporcionan. Estas funciones son:

1) Soportar la cara de la excavación y prevenir el desprendimiento del suelo.

2) Sellar la formación y el filtrado de la pasta, previniendo pérdidas de la mezcla en el suelo.

3) Suspensión de detritos, de esta manera se previene la sedimentación de material no consolidado en el fondo de la zanja; y

4) Transportar los recortes, por medio de la prevención de sedimentación en el circuito del lodo.

Todas las funciones anteriores pueden ser controladas por el manejo de las propiedades físicas de la mezcla: densidad, viscosidad, etc.

Xanthakos (1979) resume una serie de pasos y procedimientos sencillos para proporcionar el material que comprende la mezcla:

1) Determinar la densidad requerida para estabilizar la zanja. La

densidad puede ser controlada por la presencia de sólidos coloidales y no coloidales. Si se conoce la profundidad de una formación (H), la densidad requerida de la mezcla puede ser calculada por la siguiente ec. (ver FIG. 5.26).

$$\gamma_f = \frac{\gamma (1-m^2)k\alpha + \gamma^* m^2 k\alpha + \gamma_w m^2}{n^2} \quad (5.5)$$

donde:

γ_f = densidad requerida de la mezcla (g/m^3).

γ = peso relativo del suelo (g/m^3).

$k\alpha = \tan^2(45 - \phi^{1/2})$.

m = nivel natural del agua como una fracción de la profundidad total de la zanja (H).

γ_w = peso específico del agua (g/m^3).

γ^* = peso efectivo del suelo (g/m^3).

$\phi^{1/2}$ = ángulo de resistencia al corte.

n = nivel de la mezcla como una fracción de la profundidad total de la zanja (H).

2) Seleccionar la viscosidad (Embudo Marsh), en la tabla 5.24 se presentan algunos valores dependiendo del tipo de suelo.

3) Establecer y aplicar los límites de control para cada propiedad (tabla 5.25)

4) Determinar si los agentes de control ("peptizer", polielectrolitos, material para el control de pérdidas de fluidos, etc.) son necesarios y económicamente justificables.

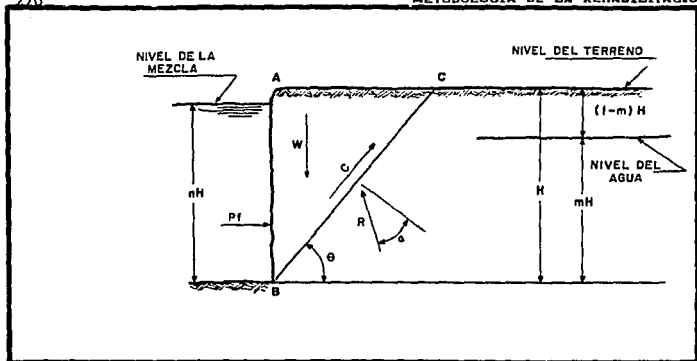


FIG. 5.26 ESTABILIDAD DE LA ZANJA

5) Proporción de los materiales constituyentes (agua, bentonita, agentes de control y sólidos no coloidales). Este paso consiste simplemente de una estimación cuantitativa, la proporción puede ser empírica y dependerá del conocimiento de las propiedades de los materiales seleccionados.

En general, el método de "las paredes impermeables" son alternativas efectivas cuando existen áreas de desperdicio de gran longitud.

Tabla 5.24.- Viscosidades de la mezcla para cada tipo de suelo (Referencia 9)

Tipo de Suelo	Viscosidad (Empudo), s/946 cm ³	
	Excavacion en Suelos secos	Excavacion en suelos conteniendo agua
Arcilla	27 - 32	
Areniscas, arcilla con arena	29 - 35	
Arenas	32 - 37	38 - 43
Arenas con particulas finas de cuarzo	38 - 43	41 - 47
Arenas con grava	42 - 47	55 - 65
Grava	46 - 52	60 - 78

Tabla 5.25.- Limites de control para las propiedades de las mezclas (Referencia 9)

FUNCION	Propiedad					
	Porcentaje en la concentracion de Bentonita (%)	Densidad (lb/ft ³)	Densidad especifica	Viscosidad Plastica Marsh	10 min esfuerzo gel (Fann) (lb/100ft ²)	Contenido pH en arenas (%)
* Soporte de la cara de la formacion	> 3-4	> 64.3	> 1.03	-	Limite establecido por el tipo de suelo	> 1
* Procesos de Cierre	> 3-4	-	-	-	> 12.5	1
* Suspension de Detritos	> 3-4	-	-	-	-	> 12-15
* Desplazamiento por concreto	< 15	< 78	< 1.25	< 20	-	< 25
* Separacion de necoloides	-	-	-	-	-	< 30
* Limpieza Fisica	< 15	< 78	< 1.25	-	-	< 25
* Bombeo de la mezcla	-	-	-	-	Variable	-
* Limites	> 3-4	> 64.3	> 1.03	< 20	> 12-15	> 12
						> 1

Ventajas y Desventajas.- En la tabla 5.26 se enlistan las ventajas y desventajas de este método.

Tabla 5.26.- Ventajas y Desventajas de las paredes impermeables (Referencia 9)

Ventajas	Desventajas
1) Métodos de construcción simple.	1) Altos costos de envío.
2) Las áreas adyacentes no son afectadas por el abatimiento del agua subterránea.	2) Algunos procedimientos de construcción son patentados y requieren una licencia.
3) La bentonita (mineral) no se deteriora con el tiempo.	3) En suelos rocosos la sobreexcavación es necesaria por causa de los peñascos.
4) La resistencia de las lechadas de bentonita son viables.	4) El deterioro de bentonita cuando las lechadas son expuestas a altas fuerzas iónicas.
5) Bajos requerimientos de mantenimiento.	
6) Se eliminan dobles riesgos al bombear a baja presión y fallas en la potencia.	
7) Elimina el cabeceo y otras obstrucciones en el suelo.	

5.6.- REHABILITACION DE OBRAS HIDRAULICAS

Enfocaremos la rehabilitación de obras hidráulicas a los problemas existentes específicamente en los pozos, para mejorar su comportamiento y su vida útil. El estudio cuidadoso de los antecedentes de diversos tipos de pozos de la región, deberá sin embargo revelar los pasos lógicos que habrán de seguirse para establecer los procedimientos de preservación y rehabilitación que deban aplicarse.

Incrustación

Uno de los problemas más comunes que se presentan en el pozo es la incrustación que se produce por algún precipitado químico o por el desarrollo de colonias bacterianas ocasionando la obstrucción o taponamiento de la tubería, la cual produce una disminución del caudal de extracción.

Las diferentes formas de incrustación son:

- 1) Incrustación provocada por precipitación de carbonatos de calcio y magnesio.
- 2) Incrustación por precipitación de sulfatos.
- 3) Incrustación bacteriana.

Un método de desincrustación es mediante el tratamiento de ácido, que por lo general se utiliza el ácido clorhídrico que contenga un inhibidor apropiado, en los tratamientos de pozos, el cual disuelve fácilmente los carbonatos de calcio y magnesio. El inhibidor sirve

para aminorar la tendencia del ácido a atacar el ademe del pozo, evitando así daños serios a la tubería durante el tratamiento.

La incrustación de tipo de carbonatos se elimina fácilmente introduciendo ácido en el pozo, desplazándolo por las aberturas de la rejilla hacia los vacíos de la formación y luego extrayéndolo por bombeo cualquier materia desprendida; cualquier procedimiento resulta efectivo, pero deben emplearse técnicas adecuadas para lograr una mejor desincrustación.

Los hidróxidos de hierro y de magnesio y sus óxidos son también muy solubles en ácido clorhídrico. Sin embargo, si el pH se encuentra por arriba de 3, estos se precipitan hacia la solución ácida. Para eliminar estos compuestos, deberán mantenerse entonces la concentración debida de ácido, hasta que éste se extraiga del pozo, por bombeo. Para ayudar a mantener el hierro en solución, deberá agregarse al ácido, un estabilizador. Para este propósito se usan las sales de Rochelle.

El ácido debe usarse a plena concentración. En la mayor parte de los casos, la cantidad de ácido que se necesita para un sólo tratamiento es de 1.5 a 2 veces el volumen de la columna de agua contenida en la rejilla. Esta dosis asegura que la rejilla quede llena y que se administre el ácido adicional para mantener la solución a la concentración correcta, conforme el reactivo reaccione con los materiales incrustantes. Si la rejilla del pozo es de una longitud mayor que 1.2 o 1.5 m, resulta mejor vaciar suficiente ácido para llenar alrededor de 1.5 m de la rejilla, haciendo subir luego la

tubería de alimentación, 1.5 m, para agregar ácido nuevamente, y continuar de esta manera hasta saturar toda la rejilla. El ácido es más denso que el agua y desplazará a ésta, pero al mismo tiempo, se mezcla de inmediato con el agua, por lo que fácilmente se diluye.

El ácido deberá agitarse dentro del pozo, por una o dos horas. Luego deberá achicarse, continuandose hasta que el agua se encuentre relativamente clara. Mientras se maneja la cuchara, el perforador podrá cersiorarse si el tratamiento ha mejorado el rendimiento del pozo.

El tratamiento se repite usando la misma cantidad de ácido de alta concentración. La agitación de la segunda dosis puede extenderse por mayor tiempo antes de achicar el pozo. Si se observa que es posible mejorar más la condición del pozo se aplica un tercer tratamiento.

Una variante del procedimiento consiste en alternar el tratamiento del ácido con la aplicación de cloro, repitiendo la combinación cuantas veces se obtengan resultados benéficos. El ácido disuelve de inmediato los carbonatos de calcio y de magnesio, en tanto que el cloro elimina la colonias bacterianas ferrosas.

El ácido sulfámico es un material granular, seco, que se transforma en un ácido líquido fuerte cuando se disuelve en agua. La solución puede prepararse en el sitio de la obra. Esto constituye una verdadera ventaja, puesto que el transporte y el manipuleo del material, en un trabajo determinado, se facilitan. El ácido sulfámico puede prepararse a una concentración que produzca resultados

comparables a los del ácido clorhídrico.

La reacción de el ácido sulfámico con los carbonatos de calcio y de magnesio, produce sulfátos de calcio y de magnesio, los cuales son altamente solubles. Su actividad es un poco más lenta que la del ácido clorhídrico, especialmente a las temperaturas que prevalecen en los pozos, por lo tanto se requiere un período de contacto mayor.

El ácido sulfámico puede introducirse al pozo de dos maneras. El método usual consiste en mezclar con agua el material granular dentro dentro de un tanque y vaciar o sifonear el ácido en forma líquida, en el pozo. Para colocar el ácido dentro de la rejilla, se puede utilizar tubería ya sea de hierro negro o de plástico.

En lugar de preparar la solución dentro de un tanque se puede vaciar el mismo material granular dentro del pozo y mezclarlo con el agua contenida en éste. Agitando un poco el agua, se logra disolver completamente el ácido. La cantidad de ácido que en este caso debe de agregarse, se calculará en base a el volumen de agua que se encuentra dentro del pozo.

Agregando al ácido un agente humedecedor, se mejora la acción de limpieza hasta cierto punto. Este agente debe ser tal que el agua no lo disocie. Además, deberá ser de baja producción de espuma y no iónico.

El hecho de que solamente una cierta cantidad de ácido sulfámico se disolverá en agua a una temperatura dada sugiere que debe introducirse en el pozo un exceso de material granular para mantener la solución a la concentración máxima. Conforme el ácido se va

desgastando en atacar a los depósitos incrustantes, el agua ira tomando más material granular del exceso disponible.

Un método moderno de ultrasonido conocido con el nombre de "Sonar-Jet" para la desincrustación; este método consiste en una sarta explosiva que se introduce al pozo a la profundidad seleccionada y se hace detonar produciendo las ondas armónicas de impacto que producen la desincrustación (FIG. 5.27). Las sargas se estudian y se diseñan para producir las vibraciones requeridas que estan en función de la longitud de sumergencia mínima que se tenga. En la tabla 5.27 se relaciona la sumergencia mínima que deben presentar las diferentes sargas de acuerdo al diámetro de ademe.

Después de realizar la aplicación de este método varias veces se ha observado que se incrementa el caudal de operación de los mismos. La aplicación de este método se efectúa cuando en los pozos ha disminuido el caudal; mediante una cámara se observa el taponamiento por incrustaciones en las ranuras del ademe. La conclusión que se ha tenido después de la aplicación de este método es que los pozos aumentan en un 50% y 80% del caudal perdido.

Cuando la incrustación se lleva a cabo por sales minerales, se puede aplicar el método de cepillado, mecánico aunque es muy poco recomendable, dado que se ha observado que este método además de no ser muy efectivo puede destruir el ademe, en algunos casos llegando a inutilizar los pozos.

De un análisis detallado a una serie de pozos se encontró que existen desarrollos orgánicos de bacterias de fierro, denominadas

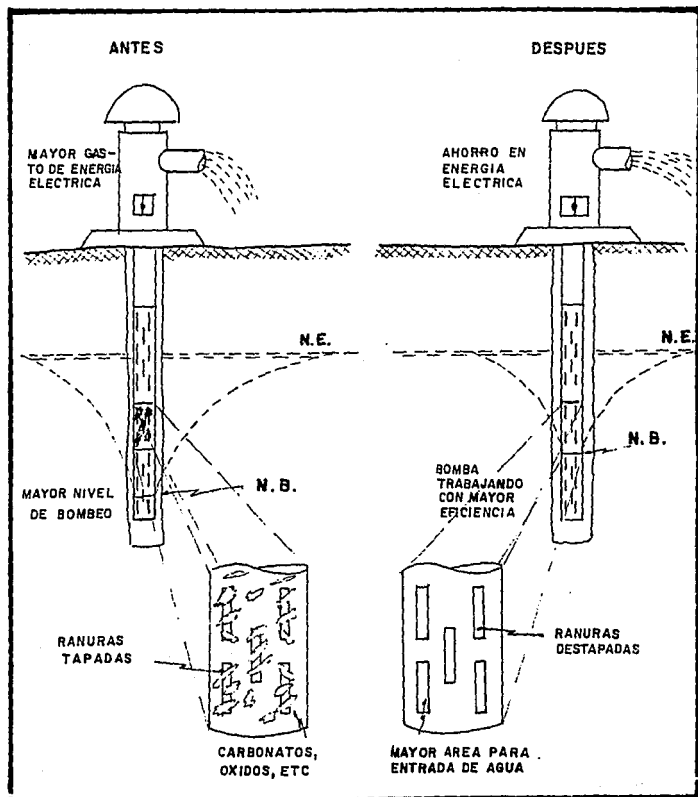


FIG. 5.27 DESINCRUSTACION, (Referencia 12).

SONAR - JET

CARTA DE MINIMA SUMERGENCIA

TIPO DE LINEA	CODIGO DE COLOR	DIAMETRO DE LA TUBERIA DE ADEME					
		4" A 6"	8" A 10"	12" A 14"	16" A 18"	20" A 24"	26" A 30"
100-1 100-3	AZUL	220 ⁵ 220	210 ⁵ 210	200 ⁵ 200	190 ⁵ 190	180 ⁵ 180	170 ⁵ 170
200-1 200-3	ROJO	220 ⁵ 220	210 ⁵ 210	200 ⁵ 200	190 ⁵ 190	180 ⁵ 180	170 ⁵ 170
300-1 300-3	VERDE	220 ⁷⁰ 220	210 ⁶⁰ 210	200 ⁵⁰ 200	190 ⁴⁰ 190	180 ³⁰ 180	170 ²⁰ 170
400-1 400-3	NARANJA	220 ⁷⁰ 220	210 ⁶⁰ 210	200 ⁵⁰ 200	190 ⁴⁰ 190	180 ³⁰ 180	170 ²⁰ 170
500-1 500-3	NEGRO	220 ⁷⁰ 220	210 ⁶⁰ 210	200 ⁵⁰ 200	190 ⁴⁰ 190	180 ³⁰ 180	170 ²⁰ 170
600-1	BLANCO	220	210	200	190	180	170
700-1	AMARILLO	220	210	200	190	180	170

TABLA 5.27.- LA CARTA MUESTRA, EL NUMERO MINIMO DE PIE, DE LA PORCION SUPERIOR DE UNA HERRAMIENTA DEBERA SER SUMERGIDA ABAJO DEL NIVEL DEL FLUIDO PARA UNA OPERACION SEGURA. (Referencia 12)

PRECAUCION

1.- Los requerimientos de sumergencia incluyen un razonable factor de seguridad, sin embargo se sugiere que cuando pozos extremadamente antiguos o pozos con ademes delgados y debilitados son encontrados, el siguiente unidad mas baja debera ser usada donde sea posible.

2.- Siempre se debe de leer y comprender las instrucciones de operacion de campo del Sonar - Jet, antes de usar herramientas de limpieza del Sonar - Jet.

bacterias *Crenotrix* y *Gallionella*, estas utilizan al fierro como una fuente de energía que las hace desarrollarse y crecer en el interior de los pozos formando masas gelatinosas y lamosas que taponan los ademes y disminuyen el gasto de extracción en el pozo. La solución para la limpieza de estas bacterias se realiza en base a la aplicación del hipoclorito de sodio que es más eficaz y recomendable, aunque la desventaja que se tiene es que su aplicación es continua por que las bacterias tienen un rápido crecimiento por lo que causan problemas a muy corto tiempo.

Corrosión

La corrosión de las rejillas, del ademe y de los equipos de bombeo instalados en los pozos puede llegar a acortar en forma severa la vida útil de éstos. Un diseño adecuado del pozo debe tomar en cuenta la posibilidad de que éste pueda deteriorarse por el efecto de la corrosión.

Algunas aguas son sumamente corrosivas de la mayor parte de los metales que pudiesen sumergirse en ellas, otras tan solo corroen a unos pocos de éstos. Por ejemplo, algunas aguas corroen de inmediato al hierro, pero no corroen al bronce. No existe un metal o aleación comercialmente utilizable en la fabricación de rejillas, que resista todos los tipos de corrosión, pero algunos ostentan un mayor rango de resistencia que otros. La investigación ha logrado eliminar gran parte del daño producido por la corrosión.

La velocidad con que se manifiesta depende de diversos factores tales como la acidez de las soluciones, la presencia o ausencia de agentes oxidantes, el desplazamiento de las soluciones sobre áreas que están siendo corroidas, el efecto electrolítico, la formación de películas o depósitos protectores y la temperatura de las reacciones corrosivas.

La corrosión se define como una actividad química sobre los materiales ejercida por agentes externos, lo cual a su vez causa que el material sea carcomido o destruido.

Las formas de corrosión, que han sido identificadas son:

- Aherrumbramiento general u otra pérdida uniforme de metal con perforaciones localizadas ocasionales.
- Pérdida de zinc o de otro elemento de alguna aleación, dejando un residuo debilitado.
- Corrosión bi-metálica, próxima al contacto entre dos metales diferentes.
- Picaduras intensamente localizadas y perforación, con muy poca pérdida de metal en su alrededor.
- Fracturación por debilitamiento corrosivo, producida en áreas de gran concentración de esfuerzos.
- Corrosión dentro de fisuras, enchufes, y por debajo de empaques o arandelas.

Desarenadores

Los problemas más frecuentes que se tienen en los pozos, es el arenamiento que en su mayoría está constituida por cuarzo. Por lo cual

la operación de la extracción de arena es muy frecuente en los pozos de agua; los daños que causa este fenómeno es el desgaste de las partes de las bombas mediante la abrasión durante la extracción; pues es visto que de acuerdo a la cantidad de arena extraída y a la velocidad de circulación de la misma actúa sobre los tazones y otros implementos de la bomba que en ocasiones llegan a inutilizarla, en unos cuantos días de uso. Según estadísticas son comunes los pozos arenosos que requieren reparación de equipo entre cada 3 y 6 meses.

Los problemas de arenamiento se deben principalmente al mal diseño constructivo ya que de prevenir el paso de las arenas al interior del pozo mediante una buena selección de las aberturas en las ranuras de la ademe y el filtro de grava.

Algunas veces se tiene áreas donde el problema de arena es tan fuerte aunque el diseño constructivo sea correcto el problema persiste, para este caso requiere rigurosamente colocar en la base o en la parte inferior de la columna de bombeo un desarenador.

Objetivo del desarenador. - Está diseñado principalmente para separar los sólidos en el líquido antes de la succión de la bomba.

Descripción del desarenador. - Consiste en un cilindro alargado que tiene una longitud generalmente de 6 a 12 metros; el cual en la parte superior presenta unas ranuras a través de las cuales entra el agua; bajo ellas se encuentra propiamente el separador, donde se realiza la separación de líquidos y sólidos, en la parte inferior, se encuentra un tubo aproximadamente de 1 pg de diámetro que funciona como descarga de arena (FIG. 5.28).

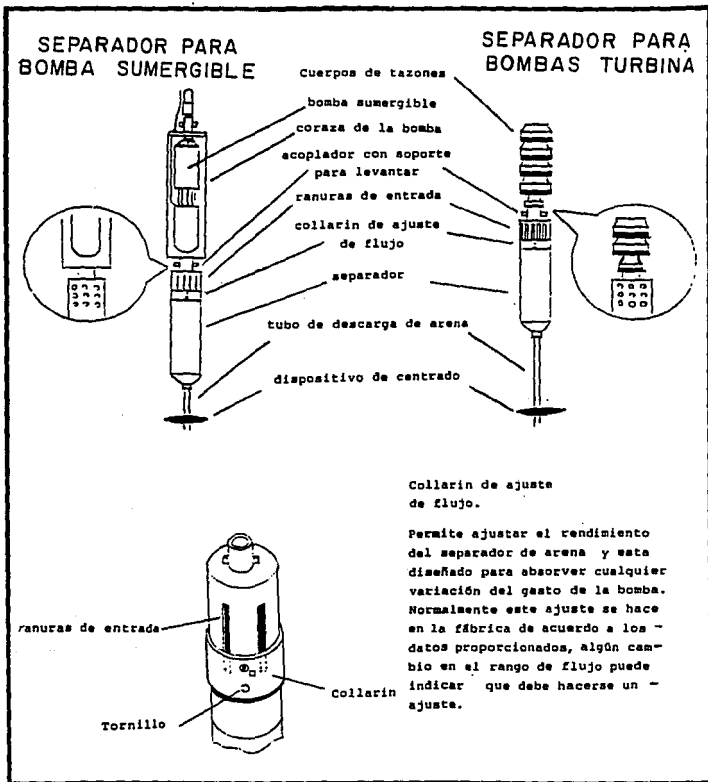


FIG. 5.28 (Referencia 12).

Funcionamiento del desarenador. Cuando los sólidos y los líquidos son succionados a través de las ranuras de entrada del separador, forman una turbulencia que, por fuerza centrífuga, impulsa a los sólidos hacia la pared del separador; que al perder velocidad se precipitan hacia el fondo de la salida de purga, por otra parte el líquido ya libre de sólidos impulsado por la baja presión causada por la acción centrífuga, fluye hacia la salida del separador y a la succión de la bomba.

Existe un tubo en la salida de la descarga que evita que las partículas desalojadas vuelvan a entrar al separador.

El separador se puede colocar abajo de los tazones o bien abajo de la bomba sumergible, esto con el objeto que genere un movimiento centrífugo, el cual influirá para que la arena decante y los líquidos libres de sólidos sean succionados por la bomba y enviados a la superficie.

Reparación de ademes y encamisado

En los pozos frecuentemente se ha encontrado colapsos en los ademes, o sea zonas donde la tubería se encuentra rota con salientes hacia el centro del pozo, que impiden el libre paso de un equipo de bombeo; se encuentran también deformaciones dentro del ademe que disminuyen el diámetro interior; tuberías de ademe desunidas y separadas longitudes considerables, a través de las cuales se introducen gravas y materiales de la formación.

Suele recomendarse la separación del ademe o bien el encamisado del mismo para estos casos.

Existen prensas hidráulicas que son introducidas al pozo y colocadas en el sitio donde existe la desviación o colapso. Esta rectifica el diámetro del pozo y, si es necesario se introduce una camisa la cual es presionada contra las paredes del pozo mediante la prensa hidráulica.

En otras ocasiones, ciertos tramos pueden llegar a ser encamisados para eliminar orquedades en las tuberías, desgarramientos, etc., introduciendo un ademe de menor diámetro y colocando un filtro de grava en el espacio anular entre las dos tuberías. El inconveniente de esta operación es la disminución del diámetro disponible para la introducción del equipo de bombeo.

Desasolve y eliminación de obstrucción

Otros problemas que frecuentemente llegan a presentar los pozos, son el desasolve y la presencia de materiales obstruyendo el pozo cuando este tiene un cierto tiempo de estar trabajando es común que se presente asolve en el fondo. El volumen de asolve depende del tipo de terreno en el que se encuentra, así como el diseño constructivo del mismo. En terrenos con materiales sueltos donde el ademe presenta ranuras de gran abertura, el pozo será más susceptible al asolve. En algunos casos, roturas en el ademe pueden ocasionar la introducción de grava del filtro y material de la formación hacia el interior del mismo, llegando asolver gran parte del pozo.

Actualmente se afronta un serio problema en casi todo el país, es la sobreexplotación de acuíferos y su consecuente abatimiento de los

niveles piezométricos, lo cual origina que constantemente se requiera alargar las columnas de bombeo. en muchos casos, el asolve de los pozos impide la colocación de longitudes mayores de la columna de bombeo. Este es el momento en que la mayor parte de los usuarios observan la presencia de asolve y realizan tareas para eliminarlo.

Se efectúa el desasolve generalmente con máquinas de percusión pequeñas, cuya movilidad permite su funcionamiento; el desasolve se realiza generalmente removiendo el fondo con una barrena pequeña y extrayendolo con cuchara de perforación.

Otro de los problemas que suelen existir en los pozos es la presencia de materiales que obstruyen el paso del equipo de bombeo.

Cuando se desconoce el tipo de obstrucción se efectúan diferentes maniobras para determinar la oclusión, siendo conveniente conocer ésta en base a una videograbación, a partir de la cual se programa la acción más conveniente a realizar para su eliminación. Las obstrucciones más comunes son la presencia de instrumentos de madera o metal que son arrojados accidentalmente dentro del pozo, así como partes de columnas de equipos de bombeo. Los fragmentos de madera o metálicos pueden ser extraídos o empujados hacia el fondo del pozo. Los fragmentos o partes de equipos de bombeo llegan ser pescados por medio de máquinas perforadoras con herramientas especiales.

6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es necesario recordar que el agua subterránea juega un papel muy importante en el desarrollo económico y social de todas las regiones en especial las comprendidas en zonas desérticas o semidesérticas, debido a que en muchos casos constituye la única fuente de abastecimiento.

Además de que el agua subterránea ofrece una mayor calidad y cantidad que las aguas superficiales, éstas llegan a ser alcanzadas por diversos contaminantes, ya sea de una manera natural o por actividades humanas, ocasionando como consecuencia la inutilización de este recurso por representar riesgos para la salud.

Teniendo en cuenta los problemas que afectan al aprovechamiento de las aguas subterráneas, se hace indispensable llevar a cabo la rehabilitación de acuíferos, pretendiendo restaurar los niveles de calidad del agua, prolongar la vida útil, aumentar y mantener los recursos del acuífero y minimizar los riesgos de salud, además de sostener el desarrollo social y económico de una región.

Otro de los problemas de las aguas subterráneas, que contribuyen a la inutilización del este recurso, es la sobreexplotación, el cual genera a su vez varios problemas que afectan directamente al almacenamiento del agua y en muchas ocasiones también es relacionado con los problemas de contaminación.

Para el desarrollo de un programa de rehabilitación de acuíferos racional y del menor costo efectivo, se deberá de hacer un número de consideraciones generales y específicas del problema, como: características del contaminante, de la fuente contaminante, hidrológicas, del suelo y del uso y requerimientos del agua, de acuerdo a un objetivo previamente determinado, el cual puede ser: prevención, abatimiento, limpieza o restauración.

El mejor procedimiento para desarrollar una metodología que controle el problema concerniente deberá ser: la comparación de alternativas sobre bases comunes, diseñar las medidas para la evaluación de resultados, comprender y considerar todos los factores posibles y aplicación de los resultados para la predicción del comportamiento del acuífero a diferentes tiempos.

En los métodos de rehabilitación de acuíferos se pueden hacer tres generalizaciones en relación con la contaminación de las aguas subterráneas: 1) Estos métodos son costosos; el costo de la rehabilitación alcanza millones de dólares. 2) Estos son tardados debido a que los contaminantes son reconocidos después de cierto número de años y consecuentemente, el tiempo de rehabilitación es prolongado y 3) Las alternativas de rehabilitación de acuíferos no siempre son totalmente efectivas.

Con el fin de reducir los problemas de las aguas subterráneas y realizar menor número de actividades para corregir los daños producidos a los acuíferos, se proponen algunos puntos como los siguientes:

1) Reducir las extracciones hasta un volumen del orden del "rendimiento seguro" (máximo volumen de extracción que no produce abatimiento indefinido ni daños irreparables al acuífero).

2) Redistribución de las captaciones para reducir la velocidad de abatimiento.

3) Promover campañas de concientización donde se propongan alternativas para el mejor uso del agua, y en donde se establezca un reglamento legal y administrativo para la explotación de acuíferos.

4) Reforzar la toma sistemática de información, simultáneamente con la explotación de los acuíferos, cubriendo aspectos cuantitativos y de calidad.

5) Promover la mayor participación y cooperación de los usuarios, en la selección e implantación de programas para el aprovechamiento del agua subterránea.

6) Restringir la descarga de desechos, tanto en la superficie como en el subsuelo, de acuerdo a las características de los sistemas de flujo de aguas subterráneas, de tal forma que garantice la calidad de los acuíferos.

Por otra parte, la aplicación de metodologías para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación nos conduce a una evaluación preliminar del riesgo de la contaminación; sin embargo, puede ser un elemento valioso en la etapa de planeación del aprovechamiento del agua subterránea y/o en ordenamiento del territorio con miras al emplazamiento de actividades potencialmente contaminantes.

Como última recomendación, se establece que la mejor manera de eliminar problemas causados por la presencia de elementos nocivos en el agua subterránea es impedir la entrada al acuífero de dichos elementos; es decir, que en este caso, como en muchos otros es mejor prevenir que corregir.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Francisco Vizcaino Muray:
LA CONTAMINACION EN MEXICO.
Ed. Fondo de Cultura Económica. México 1980.
- 2) S.W. Lohman:
HIDRAULICA SUBTERRANEA.
Ed. Ariel . Barcelona 1977.
- 3) Custodio Emilio, Manuel Ramon Llamas:
HIDROLOGIA SUBTERRANEA. Vol I y II..
Ed. Omega S.A.. Barcelona 1976.
- 4) Stanley N. Davis, Roger J.M De Wiest:
HIDROGEOLOGIA.
Ed. Ariel, Barcelona 1971.
- 5) Edward E. Johnson, Inc..
EL AGUA SUBTERRANEA Y LOS POZOS.
Publicado por: Johnson Division, UOP Inc. Saint Paul,
Minnesota. 1975.
- 6) R. Allan Freeze, John A. Cherry:
GROUNDWATER.
Prentice - Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1979.
- 7) IAHS Publ. No. 185
GROUNDWATER CONTAMINATION.

- 8) Larry W. Canter, Robert C. Knox.:
GROUND WATER QUALITY PROTECTION.
LEWIS PUBLISHERS, INC.

- 9) Larry W. Canter, Robert C. Knox.:
GROUND WATER CONTAMINATION CONTROL.
LEWIS PUBLISHERS, INC.

- 10) Stephen M. Testa, Duane L. Winegardner:
RESTAURATION OF PETROLEUM - CONTAMINATED AQUIFERS.
LEWIS PUBLISHERS, INC., 1991.

- 11) Christopher M. Palmer, Jeffrey L. Peterson, Jerold Behnke:
PRINCIPLES OF CONTAMINANT HYDROGEOLOGY.
LEWIS PUBLISHERS INC., 1992.

- 12) Juan Manuel Lesser I.:
APUNTES SOBRE REHABILITACION DE POZOS.
Lesser y Asociados, S.A.

- 13) Juan Manuel Lesser I.:
APUNTES SOBRE EL CURSO DE TECNOLOGIA DE PUNTA.
Lesser y Asociados, S.A., 1992

- 14) EXPLORACION, CUANTIFICACION Y APROVECHAMIENTO DE
RECURSOS HIDRAULICOS SUBTERRANEOS.
Centro de Educación Continua
División de Estudios Superiores
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., 1978

- 15) T. William Lambe, Robert V. Whitman
MECANICA DE SUELOS
Ed. LIMUSA - WILEY S.A..

- 16) Ernesto Murguía Vaca:
EVALUACION, EFECTOS Y SOLUCION DE LA
CONTAMINACION DEL AGUA.
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.
- 17) Oscar A. Escolero Fuentes:
METODOLOGIA PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD
DE UN ACUIFERO A LA CONTAMINACION.
Comisión Nacional del Agua.
- 18) Jaime A. Tinajero González:
APUNTES DE ASPECTOS FUNDAMENTALES EN EL ESTUDIO DEL
AGUA SUBTERRANEA (GEOHIDROLOGIA).
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.
- 19) S.A.R.H. Conferencias Internacionales.
SOBREEXPLORACION DEL AGUA SUBTERRANEA.
- 20) M.I. Raúl León Ventura:
APUNTES DE EVALUACION DE LA PRODUCCION.
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.
- 21) M.I. Carlos Islas Silva:
APUNTES DE ESTIMULACION Y REPARACION DE POZOS.
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.