



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES "ACATLAN"

FACTIBILIDAD TECNOLÓGICA DE LA
REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS
CON HIDROCARBUROS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
MANUEL SOTO QUINTOS

ASESOR:
M. EN C. RAÚL PINEDA OLMEDO



ENERO 2004





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



AGRADECIMIENTOS

PRIMERAMENTE DOY GRACIAS A DIOS POR AYUDARME A LOGRAR LA LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL.

DOY GRACIAS AL APOYO INCONDICIONAL DE MIS PADRES, HERMANOS Y HERMANAS, ESPECIALMENTE A LAURA Y ENRIQUE, A MI ESPOSA Y FAMILIARES.

DOY GRACIAS A MI ASESOR M. EN C. RAÚL PINEDA OLMEDO POR SUS COMENTARIOS, SUGERENCIAS Y POR MOTIVARME A TERMINAR ESTE TRABAJO.

DOY GRACIAS A JESÚS NÚÑEZ MORALES POR SU TIEMPO DEDICADO A LA REVISIÓN DE ESTE DOCUMENTO.

DOY GRACIAS A ISABEL ZECUA Y MARTITA POR SUS MOTIVACIONES.

DOY GRACIAS A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLÁN" POR ACEPTARME COMO ALUMNO Y PERMITIRME LOGRAR SER UN PROFESIONISTA.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: MANUEL SOTO QUINTOS

FECHA: 29/ENERO/2004

FIRMA: [Firma manuscrita]



ÍNDICE

Objetivo. Determinar la factibilidad de la remediación de acuíferos contaminados con hidrocarburos por medio de diferentes tecnologías de remediación, tomando en cuenta los límites máximos permisibles establecidos en Normas Nacionales e Internacionales.

INTRODUCCIÓN. 6

CAPÍTULO I. HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA. 9

Objetivo. Conocer las características Hidrogeológicas y Hidrogeoquímicas del agua subterránea.

1.1 Definición de hidrogeología e hidrogeoquímica. 9

1.2 Ciclo hidrológico y Distribución subsuperficial del agua. 9

1.3 Rocas y Suelos como medios de transmisión del agua. 12

1.4 Tipos de formaciones geológicas según su productividad de agua subterránea. 19

1.5 Tipos de acuíferos con respecto a su confinamiento y presión del agua subterránea. 20

1.6 Aspectos fundamentales en la circulación del agua subterránea. 20

1.7 El agua como sustancia química pura y características físico-químicas del agua subterránea. 26

1.8 Clasificación de las aguas subterráneas: 31

a) En simples y geoquímicas.

b) Por su origen y tiempo de contacto con el acuífero.

1.9 Origen y propiedades geoquímicas de las sustancias disueltas en las aguas subterráneas. 36

CAPÍTULO II. ORIGEN, USOS Y TOXICIDAD DE METALES PESADOS, DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS Y POLIAROMÁTICOS. 46

Objetivo. Conocer el origen, usos y toxicidad de metales pesados, de hidrocarburos aromáticos y poliaromáticos.

2.1 ORIGEN, USOS Y TOXICIDAD DE: 46

2.2 METALES PESADOS 46

a) Aluminio

b) Arsénico



- c) Bario
- d) Cadmio
- e) Cianuros
- f) Cobre
- g) Cromo
- h) Fierro
- i) Manganeso
- j) Mercurio
- k) Plomo
- l) Zinc

2.3 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS. 50

- a) Benceno
- b) Etilbenceno
- c) Tolueno
- d) Xileno.
- e) MTBE

2.4 HIDROCARBUROS POLIAROMÁTICOS. 52

- a) Acenafteno
- b) Antraceno
- c) Benzo (a) Antraceno
- d) Benzo (a) Pireno
- e) Benzo(B) Fluoranteno
- f) Benzo (K) Fluoranteno
- g) Benzo (g,h,i) Perileno
- h) Criseno
- i) Fenantreno
- j) Fluoranteno.
- k) Indeno (1,2,3.cd) Pireno
- l) Naftaleno
- m) Pireno

**CAPÍTULO III. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS METALES PESADOS E 56
HIDROCARBUROS AROMÁTICOS Y POLIAROMÁTICOS.
COMPARACIÓN DE LÍMITES DE LIMPIEZA POR NORMATIVIDAD.**

Objetivo. Evaluar y comparar los límites máximos permisibles de limpieza para los metales pesados e hidrocarburos aromáticos y poliaromáticos considerando Normatividad Nacional e Internacional.

3.1 Propiedades Físico-Químicas de: 56

- a) Metales Pesados 56
- b) Hidrocarburos Aromáticos 57
- c) Hidrocarburos Poliaromáticos 58

3.2 Límites Máximos Permisibles de: 59



a) Metales Pesados	59
b) Hidrocarburos Aromáticos	60
c) Hidrocarburos Poliaromáticos	61
CAPÍTULO IV. SISTEMAS DE REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS.	62
Objetivo. Determinar la eficiencia de la remediación con los sistemas de tratamiento "in situ" y "ex situ".	
4.1 Remediación para el agua subterránea contaminada.	62
4.2 Riesgos asociados con agua subterránea contaminada.	64
4.3 Planteamientos para la remediación de agua subterránea.	66
4.4 Contención hidráulica para el agua subterránea:	74
• Barreras físicas	74
• Barreras hidráulicas	75
• Pozos de extracción de agua subterránea	76
• Otras opciones de contención hidráulica	78
4.5 Diseño de sistemas para la extracción del agua subterránea:	79
• Sistemas de pozos de extracción	79
• Trincheras como sistemas de extracción	82
4.6 Tiempo requerido para la extracción de la pluma contaminante en el agua subterránea.	83
4.7 Sistemas de remediación para el agua subterránea contaminada:	90
• Tratamiento "in situ"	92
• Planteamientos innovadores de tratamientos "in situ"	99
• Tratamiento "ex situ"	100
CAPÍTULO V. EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN CASO DE REMEDIACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA.	104
Objetivo. Evaluar técnica y económicamente el caso de remediación del agua subterránea.	
5.1 Evaluación técnica-económica del caso de remediación.	104
CONCLUSIONES	171
BIBLIOGRAFÍA	172



INTRODUCCIÓN.

Se calcula que en la Tierra, existen aproximadamente 1.385.000.000 km³ de agua, de los cuales el 93.7% es salada, el 2.08 % se encuentra congelada en los polos y sólo una pequeña parte está disponible para nuestras necesidades. La renovación natural del recurso se realiza a través del ciclo hidrológico. Por precipitación cae 28% del agua en la tierra y el 72% en el mar. Del agua que cae en la tierra:

- 7% se percola a los acuíferos
- 8% va al mar por escurrimientos y, el 13% restante, regresa a la atmósfera por evaporación (de los cuerpos de agua superficiales) y evapotranspiración (de la cubierta vegetal).

De tal manera que solo el 7% del agua de lluvia se recupera en los diversos cuerpos de agua para su posible empleo como agua dulce, mientras que el 93% se pierde por medios físicos o biológicos (evapotranspiración).

Aparte de la condición climática, la distribución y abundancia del agua en el mundo depende de la geología, orografía, tipo de suelo y cubierta vegetal. Estos factores, por sí mismos, imponen variaciones en la abundancia del recurso. En especial, para la disponibilidad del agua subterránea (principal fuente de agua para consumo humano debido a que generalmente tiene una mejor calidad) influye el tipo de suelo (permeabilidad, grado de drenaje y la relación entre erosión e infiltración).

En el caso de México, de la superficie total del país, el 52% es árido y semiárido, el 13% es trópico seco, el 20% es templado y el 15% trópico húmedo. La precipitación pluvial anual promedio en el territorio nacional es de 772 mm (1528 km³) de los que 1109 km³ se evaporan, 394 km³ se transforman en escurrimientos y la recarga media de acuíferos es de 75 km³. Al igual que en el resto del mundo, la distribución es muy irregular y se concentra principalmente en el sur en las cuencas de los ríos Grijalva-Usumacinta, Papaloapan-Pánuco y Balsas durante un periodo de pocos meses. En el norte y altiplano central (regiones que representan más de la mitad del territorio nacional) se registra casi el 20% del escurrimiento medio anual y es allí donde se encuentran las 2/3 partes de la población, la mayor parte de la industria y las zonas agrícolas. Así, aún cuando el balance global del país es positivo, los balances regionales en casi la mitad del territorio muestran un déficit considerable. Tal es el caso de las regiones hidrológicas de Baja California, Bravo, Lerma y el Valle de México.

En el país se han identificado 654 acuíferos para los cuales se estima una extracción total de 27.4 Km³ anuales, asimismo, se han detectado problemas de sobreexplotación en 97 acuíferos. Estos acuíferos suministran aproximadamente el 50% de la extracción nacional para todos los usos. Debido a la sobreexplotación, la reserva de agua subterránea se está minando a un ritmo de cerca de 8 km³ por año.

Existen 17 acuíferos con problemas de intrusión salina ubicados en los estados de Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz. Entre éstos se encuentran Maneadero y San Quintín en Baja California, Santo Domingo en Baja California Sur, Caborca, Costa de Hermosillo y San José de Guaymas en Sonora. La siguiente tabla muestra la información de los acuíferos sobreexplotados y con intrusión salina.

**ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS Y CON INTRUSIÓN SALINA**

Acuíferos						
Región Administrativa	Total	Sobreeplotados sin intrusión salina	Con intrusión salina sin sobreplotación	Sobreeplotados y con intrusión salina	Total sobreplotados	Total con intrusión salina
I Península de Baja California	87	2	1	8	10	9
II Noroeste	64	13	0	5	18	5
III Pacífico Norte	24	1	0	0	1	0
IV Balsas	43	2	0	0	2	0
V Pacífico Sur	38	0	0	0	0	0
VI Río Bravo	97	13	0	0	13	0
VII Cuencas Centrales del Norte	71	21	0	0	21	0
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	127	24	1	0	24	1
IX Golfo Norte	41	4	0	0	4	0
X Golfo Centro	21	0	2	0	0	2
XI Frontera Sur	23	0	0	0	0	0
XII Península de Yucatán	4	0	0	0	0	0
XIII Valle de México	14	4	0	0	4	0
Nacional	654	84	4	13	97	17

La disponibilidad del agua depende no sólo de la cantidad, sino también de su calidad. Aunque haya agua, si está contaminada pudiera no ser adecuada al uso que se le destine. En la antigüedad, la calidad del agua se clasificaba sólo por su aspecto, sabor, color y olor. Actualmente, los avances científicos y tecnológicos han repercutido en el desarrollo de técnicas analíticas y procesos capaces de identificar y de remover una amplia lista de compuestos a tal grado de producir agua potable mediante la depuración de agua residual. Sin embargo, debido a su costo tales conocimientos no se aplican en forma común, más aún, no se plasman en políticas integrales de administración del agua que busquen:

- la conservación del recurso (agua superficial y subterránea)
- la preservación de su calidad y
- su uso eficiente (reuso, ahorro y recirculación del agua).



Cabe mencionar que los usos que se le pueden dar al agua son variados y se clasifican en:

- Consumo humano (agua potable).
- Acuícola (cultivo de peces, mariscos o cualquier otro tipo de vida acuática).
- Agricultura.
- Industria.
- Municipal.
- Recreativos.
- Transporte de desechos.

La extracción del agua en México, alcanza cerca de 72.5 Km³ por año. La tabla siguiente muestra, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CNA), el uso y extracción del agua.

EXTRACCIONES BRUTAS DE AGUA DULCE*

Uso	Origen		Volumen Total (Km ³)	Porcentaje de extracción
	Superficial (Km ³)	Subterráneo (Km ³)		
Agropecuario ^a	36.8	19.6	56.4	78
Abastecimiento Público ^b	3.3	6.2	9.5	13
Industria Autoabastecida ^c	5.0	1.6	6.6	9
Total	45.1	27.4	72.5	100

* Estimaciones año 2001

^a Los usos agrícola y pecuario definidos conforme al Art. 2 del Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), se agrupan en este concepto. Gerencia de Distritos y Unidades de Riego (GDUR). Coordinación de Uso Eficiente del Agua y la Energía Eléctrica (CUEAEE). Gerencia de Registro Público de Derechos de Agua (GRPDA).

^b Los usos público urbano y doméstico, definidos conforme al Art. 2 del Reglamento de la LAN, se agrupan en este concepto. Gerencia de Registro Público de Derechos de Agua (GRPDA).

^c Los usos: industrial, servicios y generación de energía eléctrica (excepto hidroeléctricas) definidos conforme al Art. 2 del Reglamento de la LAN, se agrupan en este concepto; y de manera adicional se incluye el uso del agua en comercios, el cual no aparece como tal en la LAN pero que así se maneja en el Registro Público de Derechos de Agua.



CAPÍTULO I. LA HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

1.1 DEFINICIÓN DE HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA.

Hidrogeología. Parte de la Hidrología que corresponde al almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre.

Hidrogeoquímica. Se limita al estudio de los aspectos geoquímicos del agua en sí y en sus relaciones con las rocas de la corteza terrestre.

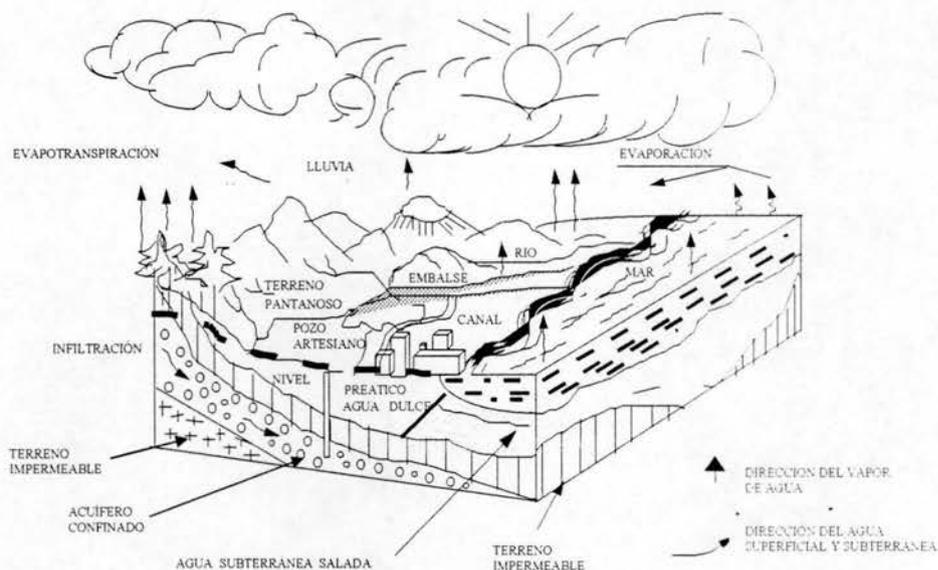
1.2 CICLO HIDROLÓGICO Y DISTRIBUCIÓN SUBSUPERFICIAL DEL AGUA.

El concepto de ciclo hidrológico lleva consigo el movimiento o transferencia de las masas de agua, de un sitio a otro y de un estado a otro. El movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: *el Sol*, proporciona la energía para elevar el agua del suelo, al evaporarla; *la gravedad*, hace que el agua condensada precipite y que, una vez sobre la superficie, vaya hacia las zonas más bajas. El ciclo se inicia cuando una parte del vapor de agua de la atmósfera se condensa y da origen a *precipitaciones* en forma de lluvia o nieve. No toda la precipitación alcanza la superficie del terreno, ya que una parte se vuelve a evaporar en su caída y otra es retenida por la vegetación o por las superficies de edificios, carreteras, etc., y de vuelta a la atmósfera, al poco tiempo, en forma de vapor. Del agua que alcanza la superficie del terreno, una parte queda retenida en charcas o pequeños surcos (*almacenamiento superficial*) y en su mayoría vuelve pronto a la atmósfera en forma de vapor. Otra parte circula sobre la superficie y se encuentra en pequeños regatos que luego se reúnen en arroyos y más tarde desembocan en los ríos (*escurrimiento superficial*). Esta agua va a parar a lagos o el mar, de donde será evaporada o se infiltra en el terreno.

Una parte de la precipitación que penetra bajo la superficie del terreno (*infiltración*) a través de los agujeros o canalículos del suelo va rellenando los poros o fisuras de este medio poroso. Una buena parte de la infiltración no desciende hasta la zona saturada o de agua subterránea, sino que se queda en la zona no saturada o zona de humedad del suelo, de donde vuelve a la atmósfera por evaporación, o de un modo cuantitativamente mucho más importante, por la transpiración de las plantas. En la práctica, no es fácil separar ambos fenómenos y se suelen denominar con el término *evapotranspiración*. El movimiento del agua a través del terreno, (percolación, infiltración o escurrimiento subterráneo) se caracteriza por su extraordinaria lentitud y se debe fundamentalmente a la acción de la gravedad. En el movimiento del agua en la zona no saturada, la tensión superficial puede jugar un papel muy importante. El agua subterránea o agua de la zona saturada puede volver a la atmósfera por evapotranspiración cuando su zona de separación con la zona no saturada (*franja capilar*) queda suficientemente próxima a la superficie del terreno. Otras veces, el agua subterránea pasa a engrosar el caudal de los ríos, alimentando directamente su cauce o a través de *manantiales*, en las zonas costeras estos manantiales, a veces, son submarinos. Excepto en las cuencas endorreicas o interiores de las zonas áridas o semi-áridas, resulta que la mayor parte de las aguas de la escorrentía y de la subterránea terminan en el mar, y por ello, puede considerarse que los océanos son el punto final del ciclo hidrológico. Pues de ellos vuelve a evaporarse el agua y se inicia de nuevo todo el proceso **Figura 1**.



FIGURA 1 CICLO HIDROLÓGICO



DISTRIBUCIÓN SUBSUPERFICIAL DEL AGUA.

Para comprender las manifestaciones del agua subterránea, se requiere estudiar la distribución vertical de ésta dentro de los materiales geológicos subsuperficiales o formaciones. Los geólogos denominan litosfera a la corteza terrestre. Cuando se refieren a la litología de una muestra de perforación, o de una sección a través de la corteza, están hablando de las clases de rocas que tienen lugar en una sucesión de capas o estratos situados por debajo de la superficie y que forman parte de la litosfera. Los geólogos denominan rocas a todos los materiales de la corteza terrestre, ya sean éstos no consolidados como las arenas y las arcillas o consolidados como el granito y la caliza.

A mayor o menor profundidad, todos los materiales de la corteza terrestre son normalmente porosos. Esta parte se denomina zona de fracturación. Los poros de esta parte de la litosfera, pueden encontrarse parcial o totalmente saturados de agua. El estrato superior, en donde las aberturas están sólo parcialmente llenas de agua, se denomina **zona de aereación**. Inmediatamente por debajo de ésta, y en donde esas aberturas se hallan completamente llenas de agua, está la **zona de saturación**. La zona de aereación se divide en tres franjas: la de humedad del suelo, la intermedia y la franja capilar. Estas varían en profundidad y sus límites no están definidos exactamente mediante diferencias físicas de los materiales geológicos. Lo que existe es una gradual transición de una a otra **Figura 2**.

La franja de agua contenida en el suelo tiene particular importancia para la agricultura puesto que es la que suministra el agua necesaria para el crecimiento de las plantas. El agua que continúa su descenso por debajo de esta franja, se escapa del alcance de las raíces de la mayoría de las plantas. Su espesor varía de acuerdo con los tipos de suelos y de la vegetación y puede extenderse desde unos pocos metros hasta varios de ellos por debajo de la superficie del terreno. En algunos casos las raíces de las plantas alcanzan la franja capilar y hasta la superficie de saturación, cuando éstas se hallan próximas a la superficie. Esto ocurre de preferencia en las áreas ribereñas. Tales plantas reciben el nombre de freatofitas que son independientes para su crecimiento, de la franja de humedad del suelo.

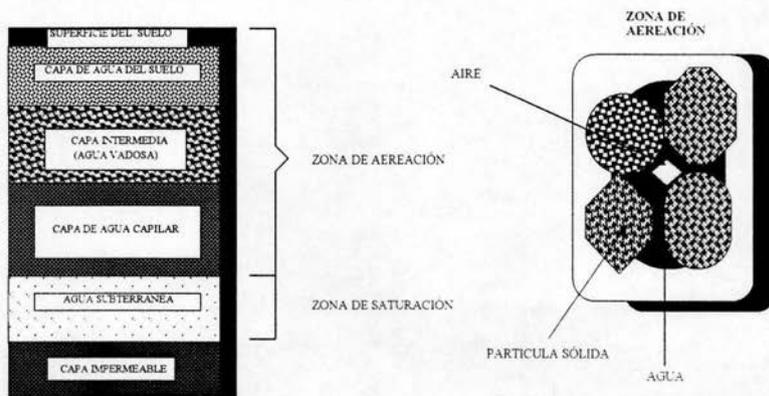


El agua utilizada por las plantas y contenida en la franja de humedad del suelo, es retenida en ésta mediante atracción molecular y acción capilar. La atracción molecular tiende a retener agua en forma de una delgada película alrededor de cada partícula de suelo. La capilaridad lo hace reteniéndola en los pequeños espacios existentes entre las partículas. Solamente cuando una cantidad suficiente de agua ha entrado a esta franja como para satisfacer la capacidad retenedora de las fuerzas capilares, es que el agua empieza a percolar, bajo la fuerza de la gravedad.

El agua que pasa a través de la capa de humedad del suelo, llega a la franja inmediata y continúa su descenso por acción gravitacional. Al igual que en la franja de humedad del suelo, la franja intermedia retiene agua suspendida por atracción molecular y capilaridad, siendo esta última la más importante de ambas fuerzas. El agua suspendida en esta franja constituye un almacenamiento fósil, puesto que no se puede recuperar para utilizarla. El espesor de la franja intermedia varía mucho, lo que tiene un efecto muy significativo en el tiempo que le toma al agua pasar a través de su espesor para recargar la zona de saturación.

La franja capilar yace inmediatamente por debajo de la intermedia y encima de la zona de saturación. Retiene agua sobre esta última mediante fuerza capilar contrarrestando la acción de la gravedad. Su espesor y la cantidad de agua que retienen depende del tamaño de los granos del material. En algunos materiales como el limo y la arcilla, la franja capilar alcanza a veces espesores de hasta 2.5 m, en tanto que en arenas gruesas y en grava llega a ser de una fracción de centímetro. El agua contenida en la zona de saturación es la única parte de toda el agua del subsuelo de la cual se puede hablar con propiedad como *agua subterránea*. La zona de saturación podría asemejarse a un gran embalse natural o sistema de embalses cuya capacidad total es equivalente al volumen conjunto de los poros de las rocas que se hallan llenas de agua. El agua subterránea se encuentra en forma de un solo cuerpo continuo o también en estratos separados. El espesor de la zona de saturación varía desde unos pocos metros hasta varios cientos. Los factores que determinan su espesor son la geología local, la presencia de poros o intersticios en las formaciones, la recarga y el movimiento o desplazamiento del agua desde las áreas de recarga hasta las de descarga.

FIGURA 2 DIVISIÓN DEL AGUA DEL SUBSUELO





1.3 ROCAS Y SUELOS COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN DEL AGUA.

Las rocas son clasificadas de acuerdo con su modo de formación u origen y posteriormente de acuerdo con los minerales que la forman en las divisiones sucesivas. Según este criterio, las rocas se dividen en tres clases: ígneas (plutónicas, filonianas y volcánicas), sedimentarias y metamórficas, según se hayan formado por cristalización de magma en profundidad o en la superficie, por acumulación y consolidación de restos de rocas preexistentes, o por medio de transformaciones de los dos tipos anteriores bajo la acción de los agentes físicos (temperatura, presión) y químicos (aportes de elementos químicos extraños a las mismas).

ROCAS ÍGNEAS PLUTÓNICAS. Se forman por la cristalización de magma en profundidad, entendiéndose por tal una mezcla fluida o pastosa formada por soluciones pastosas de materias disueltas y gases a elevada temperatura. Este magma procede de la fusión de otras rocas preexistentes al alcanzar niveles profundos de la litosfera, o bien al elevarse la temperatura del interior de la misma debido a procesos tectónicos. El proceso de cristalización es lento y existe un orden en el mismo, primero cristalizan los minerales accesorios, luego los silicatos ferromagnésicos (olivino, biotita, anfíboles, etc.), luego los feldespatos (ortosa y plagioclasas), y finalmente, el cuarzo.

La estructura de las rocas ígneas puede ser:

- a) **Granuda**, en la cual todos los elementos mineralógicos poseen aproximadamente la misma dimensión y son visibles a simple vista.
- b) **Aplítica**, estructura petrográfica basada en infinidad de cristales muy pequeños, prácticamente invisibles a simple vista.
- c) **Porfídica**, originada por la presencia de grandes cristales aislados de algunos minerales (fenocristales) inmersos en una especie de pasta cristalina formada por la aglomeración de cristales de tamaño mucho menor.
- d) **Microlítica**, además de los grandes fenocristales, se advierte que el resto de la masa cristalina está formada por cristales alargados de tamaño microscópico (microlitos).
- e) **Pegmatítica**, estructura basada en la juxtaposición de enormes cristales (del orden de decímetros) de cuarzo y feldespato.

La clasificación de las rocas ígneas se hace generalmente en base a los componentes mineralógicos de las mismas según los contenidos en uno y otro tipo de minerales. Las más importantes son:

Granitos. Roca de grano mediano o grueso de color claro, compuesta de cuarzo, feldespato potásico (ortosa) y micra negra (biotita) como elementos esenciales. Suele ser común la presencia de grandes manchas oscuras (gabarros) originadas por la acumulación de minerales ferromagnésicos (píroxenos, anfíboles). Existe una gran variedad de granitos, originada por estructuras que se apartan algo de la normal, que es la granuda, o por la abundancia de minerales accesorios que califican al granito en cada caso (hornbléndico si posee hornblenda, piroxénico si posee píroxenos, etc.). Es la roca más abundante en la corteza terrestre.

Sienitas. Son rocas de estructura y aspecto análogo al granito diferenciándose de él en la ausencia del cuarzo, y en la presencia de anfíboles, lo que les da un tono más rosado.

Dioritas. Roca granuda con feldespatos calcosódicos (albita, oligoclasa, andesita) y anfíbol, sin cuarzo libre, adquiriendo por ello colores oscuros.

Gabros. Rocas verdosas o gris oscuro, compuestas por feldespatos del tipo plagioclasas cálcicas (labradorita, bitownita, anortita) y píroxenos, aunque con frecuencia presentan también anfíboles, olivino y óxidos de hierro.

Peridotitas. Son rocas sin minerales claros, muy pesadas, oscuras, compuestas esencialmente por olivino o peridoto, además de un píroxeno.



Las rocas ígneas suelen presentarse en la naturaleza en forma de grandes masas o macizos, que rompen muchas veces la monotonía de las rocas circundantes, generalmente en muy poco espacio, formando los llamados batolitos o lacolitos si están interestratificados entre las rocas circundantes.

ROCAS ÍGNEAS VOLCÁNICAS. Si el foco magmático se halla a poca profundidad respecto de aquella, es posible que el magma pueda salir, a través de una chimenea hasta el exterior, originando un fenómeno volcánico, o simplemente un volcán, si alcanza la superficie o partes más altas de la corteza. En este sentido, pues, la lava de los volcanes no es más que un magma que ha logrado salir a la superficie del terreno, donde solidificará con mayor o menor rapidez. Las rocas originadas por este fenómeno se denominan rocas volcánicas, ya sean lavas, cenizas, bombas volcánicas, etc., pueden presentarse bajo dos aspectos estructurales distintos que son:

- a) **Rocas volcánicas** propiamente dichas, formadas al solidificarse la lava expulsada por el volcán. En este caso se pueden encontrar estructuras del tipo microlítico, fluidal (de aspecto semejante a una corriente de agua), vítrea (si la lava es amorfa y cristaliza sin una ordenación interna cristalina) vacuolar o escoriácea (si contiene gran cantidad de gases que han sido liberados dejando al descubierto grandes huecos o poros).
- b) **Rocas piroclásticas.** De carácter detrítico, formadas a expensas de la acumulación de materiales sólidos arrojados por el volcán. Se trata de partículas o cantos de formas y tamaños muy distintos, que van desde las típicas bombas volcánicas (poseen un tamaño variable, suelen considerarse como pertenecientes a esta clase los superiores a 32 mm), hasta las cenizas o lapilli (constituídos por fragmentos inferiores a 32 mm, de forma irregular, porosos, a veces vesiculares, mientras que los inferiores a 4 mm se clasifican como cenizas) acumulados por lo general en las cercanías del cráter con una estratificación muy marcada por las distintas capas a menudo de distinto color, que corresponden a erupciones distintas, o a diferentes periodos dentro de cada una de ellas.

La clasificación de las rocas volcánicas propiamente dichas se hace en base a criterios mineralógicos, excepto en aquellos casos en que la roca contiene parte vítrea o amorfa, en cuyo caso se recurre al análisis químico para conocer su composición, entre las más importantes y ordenadas de mayor a menor acidez están:

Riolitas. Rocas volcánicas con estructura fluidal con fenocristales de cuarzo, ortosa (sanidina) y biotita sobre un fondo granudo de color claro.

Traquitas. Rocas grises o amarillentas, rugosas al tacto, con feldespato potásico, plagioclasas sódicas y anfíboles y/o piroxenos.

Andesitas. Más rugosas aún que las traquitas, de color gris o negro, formados por andesita, anfíboles y piroxenos.

Basaltos. En general son las rocas volcánicas más abundantes, de color negro, muy densas, formadas principalmente por augita y olivino, con abundancia de magnetita.

Fenolitas. Caracterizadas por un contenido medio en sílice y hasta un 10 % de sodio. Los microlitos suelen estar alineados (estructura fluidal) y es sonora cuando se golpea.

ROCAS SEDIMENTARIAS. Las rocas sedimentarias sólo ocupan entre el 10 y el 20 % del volumen de la corteza (considerada hasta una profundidad de 15-16 km), en lo que respecta a la superficie total ocupada por ellas en todo el globo terráqueo ocupan el 75 % de las áreas emergidas. Los materiales de los cuales han sido formadas incluyen acumulaciones de arenas y detritos lodosos derivados de la destrucción de rocas más antiguas y llevados juntos y clasificados por el agua o el viento. Algunos sedimentos se forman principalmente de los restos de animales y plantas que vivieron en ríos, en deltas, a lo largo de las líneas de costa y en el mar (calizas conchíferas y coralígenas, el carbón y muchas mebas de hierro sedimentarias). Los sedimentos también pueden ser formados por la evaporación del agua y la precipitación de los minerales



solubles, como ocurre en los lagos playa. Las rocas sedimentarias suelen originar buenos acuíferos (areniscas, calizas, arenas, etc.).

Los componentes de los sedimentos se endurecen en rocas sedimentarias como arenisca, cuarcita, caliza y lutita por cambios que comienzan inmediatamente después que el sedimento es acumulado. El agua que percola a través de los poros entre las partículas de sedimentos acarrea materia mineral que cubre los granos y actúa como un cemento que los une. Tal proceso se le conoce con el nombre de *cementación*. La conversión de un sedimento lodoso en roca se logra principalmente por las partículas más pequeñas de limo y arcilla de las cuales están en su mayor parte compuestas, al ser presionadas por el peso de los sedimentos sobreyacentes, el agua intersticial es expulsada y la materia mineral precipitada en la redícula microscópica de los poros. En el curso del tiempo el lodo se transformará en una masa coherente de arcilla, que recibe el nombre de lodolita o lutita. El proceso se llama *compactación* que no es más que una simple consolidación y afecta al sedimento lodoso en un mayor grado que a las arenas.

Los procesos diagenéticos incluyen no sólo la cementación y la compactación sino también la solución y redepósito del material para producir rocas extremadamente fuertes o débiles. Otros cambios, como el reemplazamiento, tienen efecto en rocas particulares. Mucha sal es eliminada de los sedimentos marinos por lixiviación. Todos estos cambios tienen lugar cerca de la superficie terrestre a temperaturas normales. Cuando las rocas están completamente formadas, de nuevo, en la zona de intemperismo, quizás después de permanecer sepultadas un largo tiempo, dos sustancias solubles son removidas y las partículas insolubles son liberadas, con lo que empieza un nuevo ciclo de sedimentación en los ríos y en el mar.

Clasificación de las rocas sedimentarias desde el punto de vista de su origen:

Rocas detríticas. Si a un conjunto de partículas sólidas de tamaño determinado, se le agrega un cemento o sustancia aglutinante se obtienen las rocas detríticas, constituidas por lo tanto, por tres partes esenciales, los granos o cantos de grava y/o arena, que forman la fracción gruesa, los de arena fina o arcilla, que forman la llamada matriz y el propio cemento que puede ser calcáreo, arcilloso o silíceo, así como una mezcla en proporciones variables de éstos.

Conglomerados. Son las rocas detríticas cuyos fragmentos poseen mayor tamaño. A veces suelen presentarse con espesores muy notables. Si los cantos, en lugar de ser rodados son angulosos o subangulosos, entonces la roca se denomina una *brecha*.

Areniscas. Son rocas sedimentarias muy abundantes, que ocupan grandes extensiones y espesores en casi todas las eras geológicas. Comúnmente admiten una gran diversidad de variedades de las cuales las más importantes son las grauwacas (con poco cuarzo, cemento arcilloso y grano poco rodado, con tonos primordialmente oscuros) y las arcosas con los granos constituidos por cuarzo y feldespato, con cemento calcáreo, y relacionadas, en su origen, con rocas graníticas y areniscas silíceas con lo que los granos son casi exclusivamente de cuarzo y el cemento es arcilloso o silíceo.

Loess. Se trata de un depósito pulverulento, es decir de grano muy fino, de origen eólico, poco o nada cementado, de naturaleza sílico-margosa, y formado esencialmente por granos de cuarzo, feldespato, arcillas y micas, con algunas concreciones calcáreas de origen secundario.

Arcillas. Son las que poseen el tamaño de grano más fino (0.002 mm), con una gran complejidad mineralógica, ya que la naturaleza de las partículas que las forman puede ser muy distinta, aun dentro del grupo de los minerales arcillosos (caolínicas, montmorilloníticas, illíticas) y por ello es difícil su estudio.

Rocas de origen químico. Se originan al precipitar diversos compuestos químicos en el interior del medio acuoso en el cual se hallaban disueltos. En primer lugar por su gran difusión, las calizas, formadas por carbonato de calcio (CO_3Ca) que puede llegar a ser muy puro y las dolomías formadas por carbonato de calcio y magnesio $[(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}]$. Además existen unas rocas sedimentarias de origen salino, formados por la precipitación de cloruros, sulfatos, carbonatos, hidróxidos, óxidos, etc., de metales alcalinos y



alcalinotérricos, y que se originan en los lagos salados, mares interiores, lagos con aportes de sales en disolución, etc.

Calizas. Ocupan aproximadamente el 20 % de todos los sedimentos que se encuentran en la superficie terrestre, pueden ser de dos tipos: calizas de origen químico y calizas bioquímicas, formadas por la acumulación de caparzones o partes duras de diversos organismos. Estas últimas son las más importantes, si se tiene en cuenta su origen oceánico. Poseen una gama muy extensa de variedades: *creta* (caliza formada por caparzones de foraminíferos), *calizas conchíferas* (con gran abundancia de conchas de moluscos, ostras, rudistas, etc.), *calizas coralinas* (con restos de algas y corales de antiguos arrecifes), *calizas travertínicas o tobas* (calizas formadas por las aguas continentales), etc. Muchas veces, estas rocas poseen infinidad de restos orgánicos, denominándose entonces calizas zoógenas o lumaquelas.

Dolomías. Se componen principalmente de dolomita $[(CO_3)_2CaMg]$. El mineral dolomita comúnmente reemplaza a la aragonita y a la calcita original en una roca, derivándose el magnesio del agua marina e introducido a la caliza por soluciones que pasan a través del mineral. Los procesos de reemplazamiento se llaman *dolomitización*. El cambio de calcita a dolomita implica una contracción del volumen de un 12.3 % lo que da como resultado una estructura porosa.

Margas. Intermedias entre las arcillas y las calizas, presentan una gama extensísima desde las arcillas algo calcáreas hasta las calizas arcillosas. Suelen presentarse bien estratificadas y suelen ser blandas si el porcentaje de arcilla es elevado.

Rocas de origen orgánico. Son aquellas rocas en las cuales han intervenido directamente los seres vivos en su formación y que están formadas por restos de su misma materia orgánica, más o menos transformados. Dentro de esta clasificación tienen cabida los carbones minerales (turba, la lignita "carbón castaño", carbón bituminoso "carbón suave" y antracita "carbón duro") y los hidrocarburos naturales (petróleo, asfalto, betunes, etc.).

ROCAS METAMÓRFICAS. Las rocas metamórficas son el resultado de profundas transformaciones de tipo físico-químico que actúan sobre rocas preexistentes de cualquier tipo. Estas transformaciones pueden tener lugar desde su propia estructura de la roca preexistente, que se reajusta a las nuevas condiciones de presión, temperatura y posibles aportes químicos extraños, hasta cambios muy profundos en la misma, de forma que es imposible el reconocimiento de su roca madre "inicial".

Todas estas transformaciones son debidas al llamado proceso de metamorfismo, que puede ser originado por cambios en la presión (metamorfismo dinámico). En la temperatura (metamorfismo térmico), en particular en el llamado de contacto, o bien mixto (metamorfismo termodinámico o regional).

Estructura. Si la abundancia de estos minerales en la roca es grande (biotita y moscovita del tipo de las micas) la roca puede llegar a tomar una macroestructura esquistosa típica de las formaciones metamórficas. Otras veces los cristales se alinean más o menos regularmente dando una estructura nudolosa, como los gneis glandulares. Si el fenómeno del metamorfismo es muy intenso se originan rocas compactas, duras, sin particularidades estructurales apreciables (cuarcitas, corneanas, etc.) que no conservan ningún resto de las rocas de las cuales proceden. Entre las más importantes se encuentran:

Pizarra. Bajo la influencia de altos esfuerzos combinados con una temperatura de baja a moderada, los sedimentos argiláceos tales como las lutitas se comprimen para formar una pizarra. Algunas pizarras son derivadas de tobas volcánicas de grano fino. El valor comercial de la pizarra depende de la perfección de su crucero y de la ausencia de minerales accesorios tales como calcita y pirita, los cuales intemperizan bajo lluvia ácida que deja agujeros.

Filitas. Rocas con laminillas de clorita y sericita, que provocan la aparición de la típica estructura conocida como pizarrosidad. Al ser las primeras que aparecen en su serie conservan todavía parte de la composición original de la roca de la cual proceden. Una variedad son las filitas satinadas grises o azuladas.



Esquistos. Es una roca cristalina de una textura de grano medio, cuyos constituyentes minerales pueden distinguirse a simple vista. Variedades diferentes de esquisto se han formado de rocas sedimentarias o ígneas durante el metamorfismo regional bajo presión y temperatura moderadamente alta (esquisto de mica, esquisto de cuarzo, esquisto de clorita y esquistos de hornblenda).

Micacitas. Rocas metamórficas caracterizadas por la gran abundancia de micas (biotita y moscovita), por lo que pueden distinguirse a simple vista.

Gneis. Procedentes de las micacitas, en las cuales parte de la moscovita se transforma en feldespato ortosa, pasando entonces a ser un gneis, que además posee cuarzo.

Serpentinas. Rocas con estructura reticular, de color amarillo verdoso, compactas y resistentes. Proceden de la transformación de las peridotitas.

Mármoles. Son rocas predominantemente calcáreas procedentes del metamorfismo de las calizas. Son de color claro generalmente.

Cuarcitas. Son rocas muy duras, procedentes de la alteración metamórfica de las areniscas, y como tales, se llaman micáceas, turmalíferas, etc.; si poseen micas, turmalina, etc.

SUELOS.

Formación de un suelo. Comprende un conjunto de procesos que transforman una roca o un material en suelo. Las fases iniciales de la edafogénesis se caracterizan por un predominio de los cambios físicos y químicos, que afectan a la roca y a sus minerales, por la acción de agentes atmosféricos y por la circulación de agua. Estas reacciones se agrupan bajo la denominación de procesos de meteorización.

A medida que avanza el tiempo, empiezan a tener lugar procesos que afectan a un suelo, procesos edafogénicos, y que con los de meteorización van definiendo las características del suelo resultante. El que tenga lugar un tipo u otro de procesos depende del material de partida y de las condiciones del medio, es decir, de los factores formadores (clima, material originario, relieve, organismos, tiempo), que son los que controlan la tendencia evolutiva: dirección y velocidad.

Suelo. Se define como: formaciones constituidas por material mineral producto de la formación o desintegración de la roca madre.

En un suelo se distinguen tres fases diferentes:

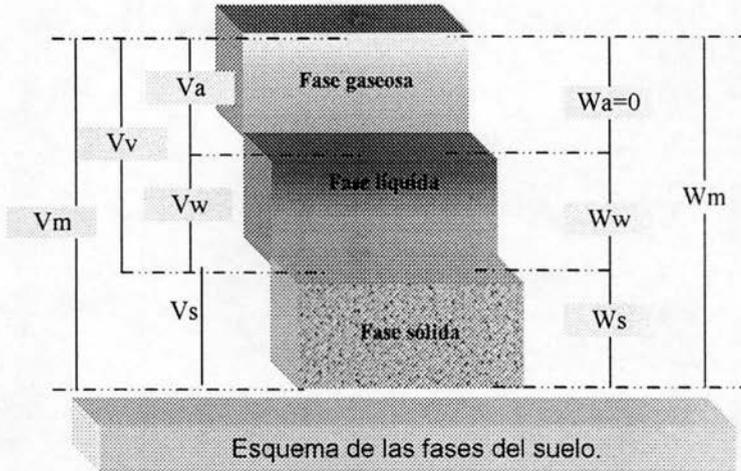
- Sólido.
- Líquido.
- Gaseosa.

La fase sólida esta constituida por partículas minerales del suelo, la líquida por el agua, y la gaseosa por el aire, si bien pueden estar presentes otros gases (vapores sulfurosos, anhídrido carbónico, etc.).

Las fases líquida y gaseosa se comprenden en el *volumen de vacíos*, en tanto que la fase sólida constituye el *volumen de los sólidos* **Figura 3.**



FIGURA 3 FASES DEL SUELO



Siendo:

- a) $V_m \Rightarrow$ volumen de la masa.
- b) $V_s \Rightarrow$ volumen de sólidos.
- c) $V_v \Rightarrow$ volumen de vacíos.
- d) $V_w \Rightarrow$ volumen de agua
- e) $V_a \Rightarrow$ volumen de aire.
- f) $W_m \Rightarrow$ peso de la masa.
- g) $W_s \Rightarrow$ peso de los sólidos.
- h) $W_w \Rightarrow$ peso del agua.
- i) $W_a \Rightarrow$ peso del aire = 0.

Se dice que un suelo es totalmente saturado cuando todos sus vacíos están ocupados por agua. Un suelo en tal circunstancia consta, de dos fases, la sólida y la líquida. Muchos suelos yacientes bajo el nivel freático son totalmente saturados. Las relaciones que se dan a continuación son importantes, para el manejo comprensible de las propiedades mecánicas de los suelos y su sentido físico.



Relación	Definición	Fórmula
Relación de vacíos o índice de porosidad	Relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos de un suelo	$e = \frac{V_v}{V_s}$
Porosidad	Relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de su masa	$n(\%) = \frac{V_v}{V_m} (100\%)$
Grado de saturación	Relación entre el volumen de agua y el volumen de sus vacíos	$G_w(\%) = \frac{V_w}{V_v} (100\%)$
Contenido de agua o humedad	Relación entre el peso del agua y el peso de sólidos	$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} (100\%)$
Grado de saturación de aire	Es una magnitud de escasa importancia práctica que relaciona el volumen de aire con el volumen de vacíos de la masa	$G_a(\%) = \frac{V_a}{V_v} (100\%)$

Granulometría. Se define como: los diferentes tamaños de partículas que constituyen un suelo determinado, así como permite inferir otras propiedades y características directamente relacionadas con el uso y comportamiento del suelo.

Clasificación utilizada a partir de 1936 en Alemania, esta basada en una proposición original de kopecky.

Material	Característica	Tamaño mm
Piedra	----	Mayor de 70 mm
Grava	Gruesa	30-70
	Media	5-30
	Fina	2-5
Arena	Gruesa	1-2
	Media	0.2-1
	Fina	0.1-0.2
Polvo	Grueso	0.05-0.1
	Fino	0.02-0.05
Limo	Grueso	0.006-0.02
	Fino	0.002-0.006
Arcilla	Gruesa	0.0006-0.002
	Fina	0.0002-0.0006
Ultra-arcilla	-----	0.00002-0.0002



Otra clasificación es la siguiente de acuerdo a Atterberg y adoptados por la International Society of Soil Science (ISSS) en 1927 y del United States Department of Agriculture (USDA).

Límite	Fracción	Justificación
>2 mm	Elementos gruesos	A partir de este tamaño las fuerzas de unión actúan difícilmente y las partículas se mantienen siempre separadas sin cohesión, incluso si están húmedas.
200 μ m	Límite superior de la arena fina (ISSS)	Por debajo de este tamaño los granos de los minerales formadores de las rocas se presentan separados, esta circunstancia tiene interés para estudios mineralógicos de arena.
50 μ m	Límite superior del limo (USDA)	El predominio de partículas de tamaño limo (50-2 μ m) en un suelo le confiere unas características físicas desfavorables, inestabilidad estructural, apelmazamiento, susceptibilidad a formar costra superficial, deficiente movimiento del agua, etc.
20 μ m	Límite superior del limo (ISSS)	Límite arbitrario.
$\leq 2 \mu$ m	Arcilla	Partículas con importante carga eléctrica superficial. Superficie específica elevada.
$\leq 0.2 \mu$ m	Arcilla fina	Partículas con carga eléctrica superficial. Comportamiento coloidal. Superficie específica muy elevada.

1.4 TIPOS DE FORMACIONES GEOLÓGICAS SEGÚN SU PRODUCTIVIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA.

Acuífero: (del latín aqua = agua y fero = llevar) es una formación geológica saturada, capaz de suministrar agua a pozos y manantiales, haciendo que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables. Como ejemplos: los aluviones de los ríos, formados por una mezcla de gravas y arenas, las areniscas poco cementadas, algunos tipos de rocas volcánicas, formaciones calcáreas muy karstificadas.

Acuícludo: (del latín claudere = encerrar o cerrar) es aquella formación geológica que conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación. Por ejemplo los cienos y légameos (arcillas por lo general) de origen deltaico y/o de estuario.

Acuitardo: (del latín tardare = retardar) medio poco permeable (semipermeable) pero que es capaz de transmitir lentamente agua. Un acuífero semiconfinado está limitado al menos por un acuitardo. Por ejemplo un nivel de arcillas limosas o arenosas pueden comportarse como un acuitardo, si está dispuesto encima o debajo de un acuífero más importante, al cual puede recargar, o incluso recibir agua del mismo.



Acuífugo: (del latín fugere = huir) aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir. Por ejemplo: un macizo granítico no alterado, o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización ni fracturación (basaltos, granitos, esquistos, etc.).

1.5 TIPOS DE ACUÍFEROS CON RESPECTO A SU CONFINAMIENTO Y PRESIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

Las funciones de un acuífero son dos: una función almacenadora y otra transmisora. Este almacena agua, sirviendo como depósito y transmite agua como lo hace un conducto.

Acuífero libre. Aquel en que el límite superior de saturación está a la presión atmosférica. También llamado acuífero freático.

Acuífero confinado o cautivo. Aquel en que el agua está en cualquier punto del mismo a mayor presión que la atmosférica y por tanto al efectuar una perforación, el agua asciende hasta un nivel superior al del techo del acuífero. Se considera que el techo y el fondo del acuífero no aportan agua (acuicludos).

Acuífero semiconfinado o semicautivo. Es un acuífero en condiciones similares al acuífero cautivo pero que puede recibir recarga o perder agua a través del techo y/o la base (semipermeables = acuitardos). En general se acepta que la recarga es proporcional a la diferencia de niveles entre los del acuífero en cuestión y los de los que están encima o debajo. Si la diferencia de niveles es negativa se produce una descarga. Si se trata de un acuífero libre con la base semipermeable se habla a veces de un *acuífero semilibre*.

1.6 ASPECTOS FUNDAMENTALES EN LA CIRCULACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

Considerando los acuíferos como sistemas físicos que poseen un cierto funcionamiento, regulado por la recarga, extracciones, etc., se comprende que deben poseer unas ciertas características fundamentales de las cuales dependa aquél. Así, estas características o parámetros permiten definir y en algunos casos, predecir, el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a unas determinadas acciones exteriores. Estos parámetros son, concretamente, *la porosidad, la permeabilidad, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento*.

POROSIDAD. Un medio poroso está formado por un agregado de granos entre los cuales existen espacios vacíos que pueden ser ocupados por un fluido; estos espacios vacíos se llaman *poros*. El medio poroso puede ser consolidado o no consolidado según que exista o no exista un cemento que aglutine y ligue las diversas partículas integrantes, o se establezca alguna cohesión entre las mismas. La cantidad de agua que un volumen unitario del material deja escapar cuando se le drena por gravedad, se denomina *rendimiento específico*.

Aquella parte del agua que no se puede remover por drenaje gravitacional, es retenida, contra la fuerza de la gravedad, por capilaridad y atracción molecular. La cantidad de agua que un volumen unitario de material retiene cuando se somete a drenaje por gravedad, se denomina *retención específica*. Tanto el rendimiento específico como la retención específica se expresan en porcentajes. El rendimiento específico sumado a la retención específica, es igual a la porosidad. La porosidad de un material viene expresada por la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y el volumen total de su masa.

$$n = \frac{V_v}{V_m}$$

donde :

V_s = Volumen de la parte sólida.

V_v = Volumen de vacíos.

V_m = Volumen de la masa ($V_m = V_v + V_s$).

**Valores de la porosidad de materiales naturales.**

Todos esos valores deben tomarse como orientativos, en especial los de la porosidad eficaz, ya que las dispersiones pueden ser importantes, en función de estado de la roca, meteorización, edad, origen, lugar, etc. La porosidad total de rocas compactas puede ser afectada por la meteorización y la fracturación por descompresión y esfuerzos tectónicos, los cuales tienden a elevarla. En las arcillas, el efecto de disminución de porosidad por compactación es importante y crece rápidamente con la profundidad, de forma exponencial. La porosidad eficaz está muy afectada por la distribución de tamaños de granos y por la presencia de arcilla y su estado de hidratación. El valor de la porosidad eficaz depende del tiempo de drenaje para los materiales con una fracción fina importante. Un valor de la porosidad eficaz puede ser poco significativo sino se indica el tiempo que ha durado la medición.

Material	Porosidad eficaz %		
	máx	min	media
Arcilla arenosa	12	3	7
Arena fina	28	10	21
Arena media	32	15	26
Arena gruesa	35	20	27
Arena con grava	35	20	25
Gravas finas	35	21	25
Gravas medias	26	13	23
Gravas gruesas	26	12	22

GRADO DE SATURACIÓN. Es el porcentaje de volumen de agua, respecto a volumen de huecos en una porción de suelo en condiciones naturales.

$$G_w(\%) = \frac{V_w}{V_v} (100\%)$$

LEY DE DARCY. El flujo de agua a través de medios porosos, está gobernada por una ley descubierta experimentalmente por Henry Darcy en 1856. Darcy investigó las características del flujo del agua a través de filtros, formados precisamente por materiales térreos. Trabajando con dispositivos de diseño especial, Darcy encontró que para velocidades suficientemente pequeñas, el gasto queda expresado por:

$$Q = \frac{dV}{dt} = KAi$$

donde:

Q = cantidad de agua que fluye a través del medio poroso, en $\left(\frac{m^3}{seg}\right)$

$\frac{dV}{dt}$ = volumen de agua que circula en un cierto tiempo



K = conductividad hidráulica, en $\left(\frac{m}{seg}\right)$

i = gradiente hidráulico, adimensional $\left(\frac{\Delta h}{\Delta l}\right)$

Δh = pérdida de carga hidráulica entre dos puntos separados a una distancia Δl

A = área transversal del acuífero, en m^2

El intervalo en que la ley de Darcy es aplicable, la velocidad del flujo es directamente proporcional al gradiente hidráulico. Esto indica que dentro del campo de aplicabilidad de la ley de Darcy el flujo en el suelo es *laminar*. Darcy construyó sus filtros de arenas finas, de lo cual se deduce que en estos suelos el flujo del agua es laminar, mientras las cargas hidráulicas no sean excesivas. En suelos más finos (mezclas de limos y arcillas o arcillas puras) el agua circula a velocidades aún menores, por lo que el flujo también es *laminar*. Las investigaciones realizadas a partir de la ley de Darcy, indican que esa ley sólo es aplicable a suelos de partículas no muy gruesas, quedando excluidas las gravas limpias, cantos rodados, etc. Para material granular cuando la velocidad de filtración es alta comienza a haber efectos no lineales en el flujo, primero de inercia y a mayor velocidad, de turbulencia. En esas condiciones no es ya válida la ley de Darcy que es lineal; el límite de su validez se da con el número de Reynolds (relación entre fuerzas inerciales y viscosas) de filtración:

$$R_e = \frac{Vd_m}{\nu}$$

donde:

V = velocidad aparente de Darcy, en $\left(\frac{m}{seg}\right)$

$d_m = d_{10}$ = diámetro efectivo de las partículas, en m

ν = viscosidad cinemática del fluido, en $\left(\frac{m^2}{seg}\right)$

si

$R_e < 1$	Flujo laminar
$1 \leq R_e \leq 10$	Flujo en transición
$R_e > 10$	Flujo turbulento

Estrictamente, la ley de Darcy deja de cumplirse para $R_e > 1$, pero no se comete mucho error si se utiliza para $R_e \leq 10$, rango en que caen la mayor parte de los casos prácticos de flujo de agua en acuíferos.

Velocidad aparente o de Darcy (V).

Se le denomina velocidad aparente, de Darcy o descarga específica de una agua subterránea, ya que el área utilizada no es la real de los conductos de filtración sino toda el área ocupada por granos, poros y agua inmóvil. Se determina de la forma siguiente:



$$V = \frac{Q}{A} \quad \left(\frac{m}{seg} \right)$$

Velocidad media del flujo subterráneo (V_m).

La velocidad con que se mueve el agua subterránea se puede determinar aproximadamente por la porosidad y la velocidad de Darcy de la forma siguiente:

$$V_m = \frac{V}{n} \quad \left(\frac{m}{seg} \right)$$

Velocidad efectiva (V_e).

La velocidad efectiva o real del agua subterránea esta dada por la velocidad aparente o de Darcy dividida entre la porosidad efectiva del material. Se expresa de la forma siguiente:

$$V_e = \frac{V}{n_e} \quad \left(\frac{m}{seg} \right)$$

Cuando el rendimiento específico (S_y) es calculado por drenaje completo de un acuífero freático (libre) y sólo si este acuífero tiene un número mínimo de espacios porosos aislados, la porosidad efectiva y el rendimiento específico pueden considerarse iguales.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K).

En 1856, el ingeniero francés Henry Darcy, descubrió la ley que regula el movimiento de las aguas subterráneas midiendo el caudal Q en función de la permeabilidad de los materiales estudiados y observó que éste equivalía a:

$$Q = KA \frac{h}{l}$$

siendo K la conductividad hidráulica, A = área de la sección, a través de la cual se produce el flujo del agua, h la diferencia de carga entre la entrada y la salida de la vasija y l el recorrido que debe realizar el agua.

Si tenemos en cuenta que $v = Q/A$ siendo v la velocidad media, resulta: $Q/A = v = K \cdot h/l$ llamado el gradiente hidráulico $i = h/l$, resulta:

$$V = Ki \quad ; \quad K = \frac{v}{i}$$

Este parámetro "K" o conductividad hidráulica, tiene las dimensiones de una velocidad, y se define como el caudal que pasa por una sección unidad del acuífero bajo un gradiente hidráulico también unidad a una temperatura fija o determinada. Los factores que determinan la permeabilidad pueden ser intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos son los propios del acuífero y dependen del tamaño de los poros. Así vemos que dos acuíferos que estuvieran formados por esferas de 0.1 m y 10^{-3} m, respectivamente, pueden tener igual porosidad, pero siempre tendrán diferente permeabilidad. Si el resto de las condiciones se mantiene, siempre tendrá mayor permeabilidad el medio que tenga partículas con mayor diámetro.



Los factores extrínsecos son los que dependen del fluido y son fundamentalmente su viscosidad y su peso específico. La viscosidad de un fluido es la medida de la fuerza resistente, por unidad de área y por unidad de gradiente de velocidad transversal a la dirección del movimiento del fluido. Tanto la viscosidad como el peso específico dependen de la temperatura, por lo que en casos especiales debe tenerse en cuenta está, sobre todo por la notable influencia de la viscosidad en la permeabilidad.

CLASIFICACIÓN DE TERRENOS POR LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.

Conductividad Hidráulica m/día	10^{-6} 10^{-5} 10^{-4}	10^{-3} 10^{-2}	10^{-1} 1	10 10^2	10^3 10^4
Calificación	Impermeables	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Calificación del acuífero	Acuícludo	Acuitardo	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de materiales	Arcilla compacta Pizarra Granito	Limo arenoso Limo Arcilla limosa	Arena fina Arena limosa Caliza fracturada	Arena limpia Grava y arena Arena fina	Grava limpia

TRANSMISIVIDAD.

La ley de Darcy ha sido expresada como $Q = KAi$. Ahora bien si la sección A es igual a la del acuífero tiene una longitud L y una altura b, tendremos $A = b \times L$ y la ley de Darcy se puede escribir como:

$$Q = K \times b \times L \times i$$

Al producto $K \times b$ se le llama *transmisividad* y se designa por T, quedando la ley de Darcy en la forma:

$$Q = T \times L \times i$$

El concepto de transmisividad fue introducido por Theis en 1935, y se define como: el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada. Se expresa en $m^2/día$ o $cm^2/día$. Acuíferos con transmisividades menores de $12 m^2/día$ son aptos para usos domésticos, mientras que para aquellos mayores de $125 m^2/día$ pueden ser buenos abastecimientos para usos público urbano, industrial y riego agrícola.

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S).

Es la cantidad de agua liberada por una columna de agua horizontal unitaria y altura igual al espesor saturado del acuífero, cuando la carga hidráulica decrece en una unidad. Es adimensional. El coeficiente de almacenamiento indica cuanta agua puede ser aprovechada por bombeo o drenaje natural. La fórmula del coeficiente de almacenamiento para acuíferos confinados como para acuíferos libres es:

$$S = S_s \times b \quad \text{para acuíferos confinados}$$

$$S = S_y \quad \text{para acuíferos libres}$$

donde:

b = espesor promedio saturado del acuífero confinado, en m



En general, para acuíferos confinados o semiconfinados el coeficiente de almacenamiento toma valores muy reducidos en el rango 10^{-2} a 10^{-5} ; en cambio para acuíferos libres el rango es de 0.05 a 0.30 y es prácticamente igual al rendimiento específico (S_y) del material situado en el nivel freático. Se considera que una transmisividad mayor de $0.015 \text{ m}^2/\text{s}$ y un intervalo del coeficiente de almacenamiento de 5×10^{-3} a 5×10^{-5} representa a un acuífero adecuado para su explotación.

ALMACENAMIENTO ESPECÍFICO (S_s).

Es el volumen de agua que sale por unidad de volumen de un acuífero cuando la carga hidráulica descende una unidad de longitud (L^{-1}). En acuíferos confinados el agua que sale al descender la presión hidráulica (presión de poro) proviene de la expansión elástica de la propia agua y de la compresión de la estructura sólida que recibe la presión que deja de soportar el agua. En un acuífero libre la liberación del agua es por gravedad. Si la estructura sólida del acuífero es elástica el almacenamiento específico es el mismo al aumentar que al disminuir la carga hidráulica; de lo contrario es menor. El almacenamiento específico debido sólo a la expansión del agua es de 10^{-6} m^{-1} . Matemáticamente, el almacenamiento específico se representa por la fórmula:

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta)$$

$$\alpha = \frac{1}{K_s}$$

$$\beta = \frac{1}{K_w}$$

donde:

- S_s = almacenamiento específico, en m^{-1}
- ρ = densidad del agua, en kg/m^3
- g = aceleración de la gravedad ($9.81 \text{ m}/\text{s}^2$)
- α = compresibilidad de la parte sólida del acuífero, en m^2/N
- β = expansión del agua, en m^2/N
- K_s = módulo de elasticidad de la estructura sólida del acuífero, en N/m^2
- K_w = módulo de elasticidad del agua, en N/m^2

Freeze y Cherry (1979) dan los siguientes rangos de valores para α

Clasificación geológica	α (m^2/N)
Arcilla	$10^{-6} - 10^{-5}$
Arena	$10^{-7} - 10^{-6}$
Grava	$10^{-8} - 10^{-11}$
Roca cementada	$10^{-8} - 10^{-10}$
Roca sana	$10^{-9} - 10^{-11}$



HOMOGENEIDAD, HETEROGENEIDAD, ISOTROPÍA Y ANISOTROPÍA.

Un medio se llama homogéneo cuando sus propiedades son constantes en cualquier lugar del mismo, si esas propiedades varían de un lugar a otro el medio es heterogéneo. Estrictamente, todo medio poroso o fracturado es un medio heterogéneo por propia naturaleza. Para efectos prácticos sólo interesan propiedades promedio, un medio en sí heterogéneo puede considerarse macroscópicamente homogéneo si las propiedades promediadas en un cierto volumen de material alrededor de cada punto considerado no varían de un lugar a otro. Así pues en la homogeneidad existe un valor de escala; una duna eólica puede ser homogénea a una escala en centímetros, mientras que una formación de gravas es muy heterogénea a esa escala, pero puede ser homogénea a la escala del m. El comportamiento de un acuífero frente a un cierto estímulo depende del volumen afectado del mismo. Un acuífero aluvial es siempre heterogéneo ante ensayos puntuales, pero puede llegar a comportarse como homogéneo en ensayos de bombeo de prolongada duración, cuando la zona influida es extensa. Una forma frecuente de heterogeneidad es la estratificación ya sea continua o discontinua.

Un medio es hidráulicamente isotrópico cuando sus propiedades principalmente la permeabilidad, no dependen de la orientación, o sea que es igual en cualquier dirección que se considere, si la permeabilidad varía con la orientación el medio es anisótropo. La anisotropía es una propiedad común en los terrenos sedimentarios debido a su propia génesis y a la presencia de intercalaciones de pequeños lentejones e intercalaciones de materiales de pequeña permeabilidad. En general la permeabilidad vertical (perpendicular a la estratificación) es varias veces menor que la horizontal, salvo que debido a la existencia de grietas y diaclasas verticales domine la permeabilidad vertical como sucede en los loess. Los terrenos fracturados son muy anisótropos por su propia naturaleza y además las fracturas suelen tener orientaciones preferentes.

La isotropía también admite un factor de escala. En un sistema estratificado puede definirse una permeabilidad global perpendicular a la estratificación cuando el flujo también es perpendicular a la misma. De forma similar en un sistema estratificado puede definirse una conductividad hidráulica global paralela a la estratificación K_h cuando el flujo es también paralelo a la misma. Puede demostrarse que siempre es $K_v \sim K_h$.

1.7 EL AGUA COMO SUSTANCIA QUÍMICA PURA Y CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

La molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, siendo su fórmula H_2O . Se trata de una molécula con enlaces covalentes y debido a que es algo asimétrica y a su fuerte polaridad, el agua posee propiedades singulares desde el punto de vista químico y físico. Físicamente se caracteriza porque es un líquido a una temperatura entre 0 y 100 °C a presión atmosférica, con un calor específico elevado (1 cal/g °C, que es el valor medio entre 0 y 100 °C), y calores de vaporización (540 cal/g a 1 atm) y de congelación (80 cal/g). Su tensión superficial es la más elevada conocida y moja con facilidad la mayoría de sustancias sólidas naturales. Presenta una notable anomalía diatómica, pues a 4 °C presenta un máximo de densidad (1 kg/litro) siendo algo menos densa a 0 °C y notablemente menos densa en estado sólido. El agua líquida es un cuerpo poco iónico, efectuándose una disociación molecular de acuerdo con la reacción simplificada:



Su conductividad eléctrica es muy baja, del orden de 0.045 $\mu S/cm$ a 18 °C, pero crece enormemente al contener pequeñas cantidades de impurezas, pudiendo llegar a ser un buen conductor eléctrico cuando contiene sustancias iónicas disueltas. El agua destilada puede tener entre 0.5 y 5 $\mu S/cm$ debido a pocas impurezas y gases disueltos. A cualquier temperatura se cumple que:

$$[H^+] \cdot [OH^-] = K$$

en la que [] indica concentración molar y K es una constante función de la temperatura, cuyo valor es 10^{-14} a 25 °C. Si el agua es pura, el equilibrio iónico exige que $[H^+] = [OH^-]$. La concentración en hidrogeniones



$[H^+]$ es una cifra muy importante, pero para evitar manejar cifras muy pequeñas, se emplea el pH que se define como $pH = -\log[H^+]$, aunque más exactamente debe tomarse $pH = -\log \langle H^+ \rangle$ indicando $\langle \rangle$ la actividad. Para el agua pura a 25 °C es $pH = 7$ y a 18 °C es $pH = 7.08$.

El agua es una sustancia químicamente muy activa que tiene gran facilidad de disolver y reaccionar con otras sustancias, tanto inorgánicas como orgánicas. Su poder ionizante y su constante dieléctrica son muy elevadas, y es el disolvente más empleado y difundido.

EL AGUA EN LA NATURALEZA COMO AGENTE FÍSICO-QUÍMICO.

El agua como disolvente. La gran capacidad de disolución del agua y su elevada reactividad hace que el agua natural contenga gran cantidad de sustancias disueltas, que entre a formar parte de la composición de muchas sustancias (hidratos, agua de formación, etc.) y que ataque a muchas otras directamente o a través de las sustancias que lleva disueltas (hidrólisis, oxidaciones, etc.). El agua pura es una sustancia que sólo se encuentra en el laboratorio precisando de notables precauciones para su preparación y conservación como tal. El agua puede disolver gases, líquidos y sólidos. El mecanismo de disolución puede ser unas veces un mecanismo simple como la disolución de nitrógeno o de azúcar, otras veces un mecanismo de simple ionización como la disolución de sal común. En otras ocasiones a veces se trata de mecanismos mucho más complejos en los que intervienen reacciones químicas con la propia agua (disolución de NH_3) o con el agua y otras sustancias disueltas en la misma (disolución de caliza en presencia de CO_2 , formación de complejos como en la disolución de metales pesados con ayuda de ácidos húmicos o ciertas sustancias orgánicas, etc.) o a través de alteraciones previas producidas por el agua en materiales en sí insolubles (ataque de silicatos).

Forma en que se encuentran las sustancias disueltas. Las sustancias disueltas pueden estar en forma molecular o en forma iónica, pero en las aguas subterráneas la forma iónica es la más importante. Normalmente se trata de iones simples como los cationes Na^+ , Ca^{++} , Fe^{++} o aniones simples como Cl^- , SO_4^{--} . Menos frecuentemente existen iones complejos, por ejemplo de Fe u otros metales pesados, formados a expensas de sustancias orgánicas o incluso de ácido carbónico; estos complejos pueden ser tanto aniónicos como catiónicos. Parte de las sustancias disueltas están en forma molecular no iónica, con frecuencia en equilibrio con especies iónicas. Así el ácido carbónico mantiene el equilibrio.



Otras sustancias están parcialmente disociadas, dan origen a iones como CO_2H^- , SH^- , $SiO_2H_3^-$, etc., en equilibrio con la forma molecular y la forma totalmente disociada, o con mayor grado de disociación. Cuanto más concentrada está un agua en una sal, mayor es la proporción de esa sal no ionizada. Para los iones de carácter débil el grado de disociación es función del pH de la disolución, el cual a su vez depende del resto de sustancias disueltas; tal sucede con CO_3^{--} , CO_2H^- , NH_4^+ , etc. En aguas subterráneas naturales clasificadas como dulces (con menos de 1000 mg/l de sustancias disueltas), la mayoría de las sustancias disueltas están totalmente ionizadas (la principal excepción es la sílice en forma de SiO_2H_4), y por ello se consideran en estado iónico.

Expresiones de las concentraciones. La concentración de los diferentes iones y sustancias disueltas puede expresarse de las siguientes maneras:

a) Expresiones en peso.

Parte por millón, ppm. Es el gramo en un millón de gramos o sea el mg/kg. La llamada en la literatura anglosajona parte por billón (ppb) que en el sistema numeral latino es la parte por mil millones (1 billón = 10^{12} en numeración latina y 10^9 en numeración anglosajona).

Miligramo por litro, mg/l. Si la concentración total de sales no supera 5000 ppm la densidad del agua es muy aproximadamente a 1 y por lo tanto **1 ppm = 1 mg/l**. También se emplea con frecuencia el g/l = 1000 mg por litro y el microgramo por litro (μ g/l) = 10^{-3} miligramos por litro. En la literatura anglosajona a veces se



usa el gramo por galón (gpg) = 17,118 ppm si se trata de galones norteamericanos y 14,3 ppm si se trata de galones ingleses (imperiales).

b) Expresiones químicas.

En las expresiones químicas los pesos de sustancias disueltas se sustituyen por el número de moles o el número de equivalentes.

$$\text{número de moles} = \frac{\text{peso de sustancia}}{\text{peso molecular}}$$

$$\text{número de equivalentes} = \frac{\text{peso de sustancia}}{\text{peso equivalente}}$$

$$\text{peso equivalente} = \frac{\text{peso molecular}}{\text{número de electrones o valencias en juego}}$$

Miliequivalentes por litro de disolución meq/l, disolución que coincide aproximadamente con los *equivalentes por millón de gramos (epm)*. Es muy empleada en análisis químico por permitir comparar directamente iones. El número de equivalentes por litro se llama *normalidad*.

Molaridad o moles por litro (moles/l), disolución de gran interés en el estudio de reacciones químicas.

Molalidad o moles por kg de agua pura, tiene interés cuando en los procesos en estudio se producen cambios de densidad o variaciones importantes en el contenido de agua.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

Temperatura. Potencial calorífico referido a un cierto origen, por ejemplo la temperatura de fusión del hielo. Se mide en grados centígrados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y en los países anglosajones en grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$). Las aguas subterráneas tienen una temperatura muy poco variable, y responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar. La temperatura afecta a la viscosidad del agua, capacidad de absorción, etc.

Conductividad (C) y resistividad (ρ). La conductividad eléctrica es la capacidad de un agua para conducir electricidad. Se mide como la conductividad que existe entre dos electrodos paralelos de 1 cm^2 de superficie cada uno y separados 1 cm situados en el seno del agua a medir de forma que el medio se pueda considerar infinito. La resistividad eléctrica se define análogamente y es el inverso de la conductividad. Es más recomendable el uso de la conductividad ya que crece paralelamente a la salinidad. Las unidades de conductividad son: $1 \text{ microsiemens/cm}$ ($\mu\text{S/cm}$) o micromhos/cm ($\mu\text{mhos/cm}$ o $\mu\Omega^{-1}/\text{cm}$); $1 \mu\text{S/cm} = 10^{-6}/\text{cm}$.

De resistividad son: 1 ohmio-cm ($\Omega\text{-cm}$). En geofísica se emplea $\Omega\text{-m} = 100 \Omega\text{-cm}$.

$$C(\mu\text{S/cm}) = \frac{10^6}{\rho(\Omega\text{-cm})}$$



La conductividad crece con la temperatura y es preciso tomar una temperatura de referencia, que suele ser 18 °C o 25 °C. Crece 2 % por cada °C. La conductividad crece con el contenido en iones disueltos. A una misma temperatura, en la conductividad de un agua influye no sólo la concentración iónica, sino el tipo de iones (carga eléctrica, estado de disociación, movilidad, etc.). Las soluciones de calibración de células conductivimétricas son las de ClK para las que se establece que:

$$C (\mu S / cm) = 1.9 R_S (\text{ppm}) \text{ a } 25^\circ \text{C}$$

$$C (\mu S / cm) = 1.57 R_S (\text{ppm}) \text{ a } 18^\circ \text{C}$$

C = conductividad. R_S = concentración en ClK.

Para aguas subterráneas puede establecerse que:

$$C (\mu S / cm) = A \cdot R_S (\text{ppm})$$

siendo los valores de A:

a 18°C A = 0.86 a 1.72 en casos extremos.

a 18°C A = 1.15 a 1.56 en casos normales.

Densidad (δ). Masa de un litro de agua. Se expresa en gr/cm^3 . Varía con la temperatura y crece con la salinidad. Puede servir para estimar el contenido en sales minerales de las salmueras. Vale 1 gr/cm^3 para las aguas dulces y 1.025 gr/cm^3 para el agua del mar, pudiendo llegar a 1.2 para las salmueras concentradas.

Color. Capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. Se mide por comparación con un standard arbitrario de $\text{Cl}_3\text{Co} + \text{Cl}_6\text{PtK}_2$. Es un valor semicuantitativo. Se expresa en ppm de Platino-Cobalto (Pt-Co) o simplemente ppm de Pt. En general está originado por materiales orgánicos de formaciones carbonosas o suelos vegetales. El agua pura en gran espesor es azulada. Si hay Fe puede tomar color rojizo, negro con Mn. Con SH_2 se produce color azulado y con ácidos húmicos amarillento. La concentración en general para las aguas subterráneas es de menos de 5 ppm Pt, anormalmente puede llegar a 100 ppm Pt.

Turbidez o turbiedad. Dificultad de un agua para transmitir la luz. Se expresa en ppm de SiO_2 (B); ppm de mástic (A); grados de bujía Jackson. Aproximadamente $B = 0.1 + 0.14 A$. En general es difícil establecer relaciones entre las diferentes unidades, pues varían con la causa de la turbidez. Mide el contenido en materias coloidales y la materia en suspensión muy fina y difícil de sedimentar y filtrar. La luz se difunde a su paso por efecto Tyndall.

El agua llamada transparente tiene menos de 1.42 ppm SiO_2 y permite ver en 4 m de espesor. Hasta 2.85 ppm SiO_2 se llama opalina, hasta 6.25 algo turbia, hasta 9.00 turbia con más de 9.00 muy turbia. En general las concentraciones son menores a 1 ppm en aguas subterráneas.

Materia en suspensión. Contenido en materiales sedimentables o que pueden ser retenidos por un filtro. Se expresa en ppm o en cc/litro, según el método empleado, siendo muy difícil la conversión ya que ambos valores dependen de muchas circunstancias.

Las aguas de origen subterráneo no tienen materia en suspensión excepto en circulaciones kársticas o si se ha obtenido en una captación mal desarrollada en la que se producen arrastres. En general en aguas subterráneas las concentraciones son menos a 1 ppm.

Sabor. El sabor del agua es una determinación organoléptica subjetiva, de interés en agua potable. Las aguas con más de 300 ppm de Cl^- tienen gusto salado, las que tienen más de 400 ó 450 ppm de SO_4^{2-} tienen gusto salado y amargo, las que tienen mucho CO_2 libre tienen gusto picante, etc.

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y FÍSICO-QUÍMICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA.**

Concentración de hidrogeniones, pH. El pH crece el 8 % / °C al crecer la temperatura y por tanto hay que darlo referido a una cierta temperatura, por ejemplo 18°C ó 25°C. Por lo general varía entre 6.5 y 8 y más raramente entre 5.5 y 8.5. En casos excepcionales puede variar entre 3 y 11. El agua marina tiene un pH aproximado de 8. Aguas con pH < 7 suelen ser agresivas, pH > 9 crea dificultades en las plantas. Los peces soportan valores entre 5.0 y 9.5 pero el intervalo óptimo está entre 6.5 y 8.5.

Residuo seco (Rs) y total de sales disueltas (Sd). El residuo seco es el peso de materiales resultante de evaporar 1 litro de agua. El total de sales disueltas mide el peso de todas las sustancias disueltas en el agua, sean o no volátiles. El residuo seco varía algo con la temperatura de secado, y conviene fijarla por ejemplo 105-110 °C o 180 °C. A 105-110 °C pueden existir algunos bicarbonatos, algo de agua de hidratación y algunas materias orgánicas. A 180 °C no quedan bicarbonatos pues pasan a carbonatos, se quema o volatiliza la mayoría de la materia orgánica y se desprende todo el agua de hidratación.

El total de sales disueltas difiere del residuo seco a 110 o 180 °C en que se cuenta todo el CO₃H presente, el cual durante el calentamiento puede llegar a la precipitación se descompone en CO₃²⁻ y CO₂ que se escapa. Aproximadamente $Sd \approx Rs + \frac{1}{2} CO_3H^-$ en ppm. A veces se da como total de meq/l de cationes + aniones = 2M (M = contenido total en aniones o cationes, tomar la semisuma). En un análisis debe cumplirse que:

$$\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones} + \sum \text{coloides} - 1/2 CO_3H^- \approx R_s \text{ a } 110 \text{ ó } 180^\circ C \text{ en ppm}$$

Entre 50 y 1500 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a 300 000 ppm en salmueras. El agua del mar tiene alrededor de 35 000 ppm.

Alcalinidades TAC y TA. La alcalinidad es la capacidad de un agua para neutralizar ácidos. La alcalinidad TAC mide la capacidad hasta pH = 4.5 (viraje del anaranjado de metilo) y la alcalinidad TA hasta pH = 8.3 (viraje de la fenolftaleína). Miden el contenido de aniones hidrolizables. Se expresa usualmente en ppm de CO₃Ca o meq/l (1 meq/l = 50 ppm CO₃Ca). Un agua con pH < 7 puede tener cierta alcalinidad TAC, aunque se le considere ácida por su pH. Las alcalinidades miden el efecto de los iones CO₃H⁻ y CO₃²⁻ y también de los OH⁻, SiO₄H₃⁻, PO₄³⁻, BO₃H₂⁻, F⁻, etc., pero en aguas subterráneas estos últimos influyen poco. Si es pH < 8.3 es TA = 0 y CO₃H⁻ = TAC en meq/l, o bien CO₃H⁻ (ppm) = 1.22 TAC (ppm CO₃Ca). El valor TAC está generalmente entre 100 y 300 pudiendo a veces estar entre 50 y 500 ppm de CO₃Ca. Excepcionalmente puede llegar a 1000. El agua de mar tiene un TAC de alrededor de 100 ppm CO₃Ca. El valor de TA es generalmente 0 y puede llegar a 10 en aguas bicarbonatadas sódicas y excepcionalmente a 50 ppm CO₃Ca.

Acidez. Capacidad de un agua para neutralizar bases. Es raro que las aguas naturales tengan acidez. Puede producir acidez la oxidación de sulfuros, hidrólisis de iones del Fe, Al y del NH₄⁺. La oxidación de sulfatos precisa mucho oxígeno y sólo puede dar acidez importante en las proximidades del nivel freático y en medio no saturado.

Durezas total (D_t), permanente (D_p) y temporal o carbonatada (D_c).

La dureza mide la capacidad de un agua para consumir jabón o producir incrustaciones. Las definiciones actuales la identifican con el contenido en iones alcalinotérreos, esencialmente Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺.

Dureza total = contenido total en Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺.

Dureza permanente = contenido total en Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ después de ebullición (se precipitan los carbonatos).

Dureza temporal o carbonatada = total de calcio y magnesio, asociados a CO₃H⁻ y CO₃²⁻.

Por definición es D_t = D_c + D_p.

La dureza también se llama título hidrotimétrico TH.



Se expresa en ppm CO_3Ca o °F.

D (meq/l) = $r\text{Mg} + r\text{Ca}$; r = meq/l.

$$D(\text{ppmCO}_3\text{Ca}) = \frac{\text{Ca}(\text{ppm})}{20} + \frac{\text{Mg}(\text{ppm})}{12} \cdot 50$$

Las aguas se pueden clasificar por su dureza, pero esta clasificación varía con las localidades de acuerdo con las aguas disponibles. Aguas con menos de 50 ppm en CO_3Ca se llaman blandas, hasta 100 ligeramente duras, hasta 200 moderadamente duras y por encima muy duras. La dureza incluye el efecto del Sr^{++} , que es pequeño en general, al igual que el efecto del Fe^{++} . Al consumo de jabón también contribuyen ciertos metales pesados y ácidos libres. Las aguas duras son incrustantes, producen gran consumo de jabón y dificultan la cocción de alimentos. Las aguas muy blandas son agresivas y pueden no ser adecuadas para beber.

Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Capacidad de un agua para producir oxidantes en procesos químicos. Se expresa en ppm en O_2 tomado del MnO_4K , a veces del $\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$. La materia orgánica se refiere al método del permanganato y a la demanda química al método del dicromato). Mide el contenido en materiales orgánicos oxidables y también otras sustancias que consumen oxígeno, tales como, Fe^{++} , Mn^{++} , NH_4^+ , etc. Es un dato semicuantitativo. En aguas con elevado contenido de Cl^- se obtienen siempre valores elevados por interferencia ya que parte del ion Cl^- puede pasar a cloro libre. Valores generalmente de 1 a 5, hasta 15 ppm de O_2 en aguas no contaminadas. Valores elevados interfieren en ciertos procesos industriales y pueden explicar malos sabores en el agua de beber.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

Medida de la cantidad de oxígeno necesario para eliminar la materia orgánica contenida en un agua mediante procesos biológicos aerobios. Comúnmente se refiere a 5 días. Se expresa en ppm de O_2 . Es una medida importante de contaminación y debe referirse a un cierto tiempo (24 hrs. o 5 días). Los valores en aguas subterráneas por lo general son de menos de 1 ppm O_2 . Valores más elevados indican contaminación, ya que significa una falta o demanda de oxígeno.

Demanda de cloro y break-point.

Está característica general de las aguas no es más que una medida del contenido en materia orgánica y tiene mucho interés en tratamientos de esterilización de aguas para abastecimiento, pero es poco importante desde el punto de vista de características de las aguas subterráneas. Si se toman toda una serie de muestras iguales de agua y a cada una se le añade una cantidad creciente de gas cloro y transcurrida 1 hora se determina el cloro libre, se observa que una de las muestras presenta un mínimo que no coincide en general con la muestra a la que inicialmente se le ha añadido menos cloro. Este fenómeno es debido a que los compuestos que forma el cloro con la materia orgánica se destruyen al aumentar la concentración de éste. La dosis de ese mínimo es el valor de break-point. Al break-point corresponde el mínimo gusto residual y la máxima decoloración. Muchas aguas subterráneas, con muy poca materia orgánica dan un valor casi cero para el break-point. En aguas superficiales se puede llegar a varias decenas de ppm en Cl_2 . El punto de ruptura o break-point corresponde al comienzo de la destrucción de los compuestos que previamente ha formado el cloro con la materia orgánica y compuestos amoniacales que puedan existir (cloraminas).

1.8 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.

Las diferentes clases de aguas subterráneas se clasifican a fin de informar de forma breve de su composición química o de algunos aspectos de la misma. Las clasificaciones simples sólo dan una información global y en general se establecen con vista a su uso doméstico, urbano, industrial o agrícola. Las clasificaciones geoquímicas contienen más información de carácter geoquímico y en cierta manera tienden a



“expresar” de forma concisa lo que se obtiene con los diferentes tipos de diagramas. Las clasificaciones geoquímicas han sido objeto de numerosos trabajos e investigaciones por parte de científicos soviéticos

Clasificaciones simples.

a) Por el residuo seco

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Agua dulce (fresh water) | 0 a 2000 ppm a veces 3000. |
| 2. Agua salobre (brackish water) | hasta 5000 ppm a veces 10 000. |
| 3. Agua salada (salt water) | hasta 40 000 ppm a veces 100 000. |
| 4. Salmuera (brine) | hasta saturación. |

b) Por la dureza

- | | |
|------------------|--|
| 1. Blanda (soft) | 0 a 50 ppm en CO_3Ca . a veces hasta 60. |
| 2. Algo dura | hasta 100 ppm en CO_3Ca . a veces hasta 120. |
| 3. Dura (hard) | hasta 200 ppm en CO_3Ca . a veces hasta 250. |
| 4. Muy dura | hasta saturación. |

c) Por propiedades destacadas

Esta clasificación es muy variada según usos. Así:

Selenitosa si tiene más de 500 ó 600 ppm en SO_4^{2-} .

Ferruginosa si tiene hierro en cantidad tal que produce un precipitado de óxido de hierro al tomar contacto con el aire.

Carbónica si desprende burbujas de CO_2 a la temperatura y presión ambientes.

Lítica si contiene cantidades medibles de ese elemento.

Sulfhídricas si huele a ácido sulfhídrico o “huevo podrido” (a veces llamadas inapropiadamente sulfurosas).

d) Clasificación Relación de Adsorción de Sodio (RAS).

Esta clasificación tiene en cuenta la conductividad del agua C y el valor RAS.

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

en donde las concentraciones de los cationes se dan en miliequivalentes por litro (meq/l), que es de interés agrícola.

Clasificaciones geoquímicas.

a) Por los iones dominantes

Se nombra el agua por el anión o el catión que sobrepasa al 50 % de sus sumas respectivas. si ninguno supera al 50 % se nombran los dos más abundantes. Si conviene se puede añadir el nombre de algún ion menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta. Para simplificar la expresión a cada posible ordenación de aniones y cationes se les da un número y una letra que sirven para denominar el agua. Cuando interese resaltar además la mineralización total del agua se puede añadir una clasificación de acuerdo con la conductividad, por ejemplo, de acuerdo con la clasificación RAS para aguas agrícolas. Los grupos que se hacen son:



Aniones

- 1 $rCl > rSO_4 > rCO_3H$
- 2 $rCl > rCO_3H > rSO_4$
- 3 $rSO_4 > rCl > rCO_3H$
- 4 $rSO_4 > rCO_3H > rCl$
- 5 $rCO_3H > rCl > rSO_4$
- 6 $rCO_3H > rSO_4 > rCl$

Cationes

- a $rNa > rMg > rCa$
- b $rNa > rCa > rMg$
- c $rMg > rNa > rCa$
- d $rMg > rCa > rNa$
- e $rCa > rNa > rMg$
- f $rCa > rMg > rNa$

Clasificación de calidad del agua para riego.

- C-1 Conductividad a 25 °C entre 0 y 250 $\mu S/cm$ (entre 0 y 215 a 18°C)
 C-2 Conductividad a 25 °C entre 250 y 750 $\mu S/cm$ (entre 215 y 650 a 18°C)
 C-3 Conductividad a 25 °C entre 750 y 2250 $\mu S/cm$ (entre 650 y 2000 a 18°C)
 C-4 Conductividad a 25°C mayor que 2250 $\mu S/cm$ (mayor que 2000 a 18°C)

La simplicidad de estas clasificaciones no permite, en general, buenas deducciones en cuanto a relaciones entre aguas, pero se adapta bien a determinar zonas en planos de composición química por emplear sólo dos signos acompañados o no de la identificación de salinidad. Se adaptan bien a su representación en diagramas triangulares (diagrama triangular de Piper).

b) Clasificación de Chase Palmer

Esta clasificación geoquímica es la más antigua y su interés es histórico. Se basa en la comparación de aniones con cationes en un cierto orden, como si se tratase de formar sales hipotéticas por orden de mayor a menor solubilidad. Esta clasificación distingue en el agua dos propiedades fundamentales: la salinidad y la alcalinidad; la salinidad corresponde a las sales de aniones no hidrolizables, principalmente los cloruros, sulfatos y nitratos; la alcalinidad es debida a sales hidrolizables, principalmente los bicarbonatos. Los cationes se dividen en tres clases: 1) los que comunican propiedades primarias o alcalinos, Na^+ y K^+ ; 2) los que comunican propiedades secundarias o alcalinotérreas Ca^{++} , y Mg^{++} ; 3) los que comunican propiedades terciarias o hidrolizables, como H^+ , Al^{+++} , etc. En la clasificación de Palmer se trabaja en % de meq/l de aniones y de cationes

c) Clasificación de Souliné

Se trata de una clasificación propuesta en 1948 que pretende evidenciar los fenómenos de cambios de bases. El agua se clasifica de acuerdo con su tipo, grupo y clase.

Tipo	Denominación	$r(Na-Cl) / rSO_4$	$r(Cl-Na) / rMg$
1	Sulfatado sódico	<1	negativo
2	Bicarbonato sódico	>1	negativo
3	Clorurado magnésico	negativo	<1
4	Clorurado cálcico	negativo	<1

Grupo	Características	Clase	Características (Palmer)
A	rCO_3H^+ dominante	a	A2. dominante
B	rSO_4^{--} dominante	b	S2. dominante
C	rCl^- dominante	c	S1. dominante
		d	S3. dominante
		e	A1. dominante
		f	A3. dominante

**d) Clasificación de Schoeller**

Esta propuesta de 1955 tiene en cuenta los valores absolutos de las concentraciones de cada ion, pero conduce a una denominación complicada. Se distingue: a) tipo en el que participan los aniones fundamentales en el orden Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3H^- , aportando cada uno un signo, b) grupo dado por la relación entre iones y formado por tres símbolos, c) clase dada por la clasificación expuesta en el apartado a).

Grupo de cloruros	Denominación	Valor r Cl	Observaciones
1	Hiperclorurado	>700	hasta saturación
2	Clorotalásico	700 a 420	agua del mar 560
3	Clorurado fuerte	420 a 140	
4	Clorurado medio	140 a 40	
5	Oligoclorurado	40 a 15	
6	Clorurado normal	<10	

Grupo de sulfatos	Denominación	Valor r SO_4	Observaciones
1	Hipersulfatado	>58	agua del mar 58
2	Sulfatado	58 a 24	
3	Oligosulfatado	24 a 6	
4	Sulfatado normal	<6	

Grupo de bicarbonatos	Denominación	Valor r CO_3H
1	Hiperbicarbonato	>7
2	Bicarbonatado normal	7 a 2
3	Hiperbicarbonatado	<2

CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS POR SU ORIGEN Y TIEMPO DE CONTACTO CON EL ACUÍFERO.**a) Aguas vadasas o meteóricas o recientes.**

Son las incluidas en el ciclo del agua en la hidrosfera-litosfera-atmósfera. Se les puede caracterizar fácilmente por poseer algunos radioisótopos de vida no muy larga (tritio, radiosilicio, etc.) de origen atmosférico y una composición isotópica similar a la del agua de lluvia. Prácticamente toda el agua de la tierra es meteórica pero sólo se considera como tal la que actualmente interviene en el ciclo y no la que accidentalmente ha sido separada del mismo. Su composición está influida principalmente por la del agua de infiltración y la del material del acuífero.

b) Aguas marinas.

Son las del mar que han invadido recientemente sedimentos costeros. Son similares en composición a la del mar, quizás con mayor dureza y composición isotópica similar.



c) Aguas fósiles.

Son aguas atrapadas en el terreno y que permanecen en él durante miles de años. No es preciso que sean estacionarias sino que basta con que el movimiento sea lento y el recorrido largo. Son aguas en general muy salinas pues el contacto con el terreno es muy prolongado. Muchas aguas fósiles son en realidad una mezcla de verdaderas aguas fósiles y aguas meteóricas. El término aguas fósiles es en ocasiones utilizado inapropiadamente y se confunde con aguas meteóricas de elevada salinidad.

d) Aguas congénitas.

Son las aguas atrapadas en el momento de la formación de los sedimentos. Esta agua atrapada es expulsada después de la consolidación, pero si la roca final es aún porosa puede quedar algo del agua de imbibición en ella, que es el agua congénita. Con frecuencia esta agua congénita es desplazada y se acumula en otros materiales donde puede sufrir una mezcla mayor o menor con aguas vadosas; en este caso no se trata de aguas congénitas de la formación sino de aguas emigradas. Las aguas congénitas no son necesariamente aguas fósiles, pues pueden corresponder a sedimentos muy recientes. Las aguas congénitas, las fósiles y las emigradas suelen ser fuertemente cloruradas y suelen estar en relación con el agua de mar de otras épocas enriquecidas en Γ , B, SiO_2 , NO_3^- o NH_4^+ y Ca^{++} y empobrecidas en SO_4^- y Mg^{++} . El contenido en deuterio es igual o menor que el del agua de mar. En ocasiones pueden ser de temperatura superior a la normal. El agua de las yacimientos de petróleo ha sido interpretada como agua congénita, pero es más adecuado considerarla en muchos casos como agua estancada emigrada.

e) Aguas juveniles, metamórficas, magmáticas y volcánicas.

Las **aguas juveniles** son aquellas que proceden del interior de la tierra sin haber estado antes en superficie y su interés es limitado. Muchas aguas consideradas juveniles son, meteóricas, por lo menos en su mayor parte, como lo demuestra su elevado contenido en tritio. Las **aguas metamórficas** son las desprendidas de sedimentos en proceso de metamorfismo, suelen tener elevados contenidos en CO_2 , CO_3H^- y B, algo elevado en Γ y pueden ser menos cloradas que el agua del mar, aunque el valor absoluto sea elevado, su contenido en deuterio es menor o igual que el del agua marina. A veces tienen temperaturas elevadas si ganan rápidamente la superficie del terreno. Las de **origen magmático** y las **volcánicas** se desprenden de las emisiones de lava, gases volcánicos, etc., y suelen ser de tipo clorurado sódico y tienen contenidos anormalmente elevados de Li^+ , F, SiO_2 , B, S^- , CO_2 , y bajos en Γ , Br, Ca^{++} y NO_3^- o NH_4^+ .

f) Aguas minerales.

Son aguas de composición química muy variada, pero que se caracterizan por poseer elementos en disolución en cantidad notable o grande, que las aguas vadosas normales no poseen. Suelen estar relacionadas con fenómenos volcánicos y orogénicos y muchas veces son termales. Otras veces son simplemente el resultado de circular el agua por terrenos que pueden aportar grandes cantidades de sales solubles.

g) Aguas saladas y salmueras naturales.

En la naturaleza son frecuentes las formaciones que contienen agua salada y salmueras naturales. Actualmente se acepta el origen marino de muchas de esas aguas saladas y salmueras pero es preciso admitir que en su larga permanencia en el terreno, con frecuencia de millones de años, han sufrido procesos modificadores que pueden haber alterado su fase original. Entre los posibles procesos modificadores que conducen a un incremento de la salinidad cabe destacar la ultrafiltración, proceso mediante el que un agua forzada a pasar a través de niveles arcillosos continuos, puede dejar atrás gran parte de sus sales. El agua salada o salmuera así originada puede permanecer donde se formó o bien emigrar hacia otras formaciones a merced de la evolución geológica y geohidrológica de los terrenos. Localmente pueden originarse aguas saladas y salmueras en áreas geotérmicas que pierden vapor de agua al exterior y más raramente en zonas muy frías en las que la congelación progresiva del agua del terreno (afecta a profundidades muy reducidas), en especial si era marina, produce la separación de hielo por un lado y una salmuera por otro.



Es frecuente que las aguas saladas y salmueras naturales corresponden a aguas profundas pero no siempre es así, cuando existen niveles permeables profundos con circulación, en cuyo caso estos niveles sufren un desplazamiento del agua original y un lavado mientras los niveles menos permeables intermedios siguen reteniendo el agua original.

1.9 ORIGEN Y PROPIEDADES GEOQUÍMICAS DE LAS SUSTANCIAS DISUELTAS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.

En una agua subterránea natural, la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Unos cuantos de estos de estos iones se encuentran presentes casi siempre y su suma representa casi la totalidad de los iones presentes; estos son los iones fundamentales:

Aniones			Cationes	
Cloruro	Cl ⁻		Sodio	Na ⁺
Sulfato	SO ₄ ²⁻		Calcio	Ca ²⁺
Bicarbonato	CO ₃ H ⁻		Magnesio	Mg ²⁺

Es frecuente que los aniones nitrato (NO₃⁻) y carbonato (CO₃²⁻) y el catión potasio (K⁺) se consideran dentro del grupo de iones fundamentales aun cuando su proporción es pequeña. Otras veces se incluye el ion ferroso (Fe²⁺). Entre los gases deben considerarse como fundamentales el anhídrido carbónico (CO₂) y el oxígeno disuelto (O₂), aunque no es frecuente que se analicen en aguas subterráneas. Entre las sustancias disueltas poco ionizadas o en estado coloidal son importantes los ácidos y aniones derivados de la sílice (SiO₂).

El resto de iones y sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades notablemente más pequeñas que los anteriores y se llaman *iones menores* a aquellos que se encuentran habitualmente formando menos del 1 % del contenido iónico total y *elementos traza* a aquellos que aunque presentes están por lo general en cantidades difícilmente medibles por medios químicos usuales. Los iones menores más importantes son, además de los ya citados NO₃⁻, CO₃²⁻, K⁺ y Fe²⁺, el NO₂⁻, F⁻, NH₄⁺ y Sr²⁺. Suelen estar en concentraciones entre 0.01 y 10 ppm. En concentraciones entre 0.0001 y 0.1 ppm, suelen estar los iones menores:

Aniones: Br⁻, S²⁻, PO₄³⁻, BO₃H₂⁻, NO₂⁻, OH⁻, I⁻, etc.

Cationes: Fe³⁺, Mn²⁺, NH₄⁺, H⁺, Al³⁺, etc.

Los iones metálicos derivados del As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U, etc., a veces están en cantidades medibles, pero en general son elementos traza. El resto de posibles iones están casi siempre en cantidades menores que 0.0001ppm.

Características químicas de los iones y sustancias disueltas más importantes.

Aniones y sustancias aniónicas.

➤ Ión Cloruro, Cl⁻.

Procede de:

- Lavado de terrenos de origen marino: las aguas congénitas y fósiles pueden aportar cantidades importantes.
- Agua de lluvia y su concentración en el terreno.
- Mezcla con agua marina en regiones costeras.
- Ataque de rocas, aunque en general el aporte es pequeño por ser un elemento escaso en la corteza terrestre. Muy localmente tiene interés el aporte de ion cloruro por rocas evaporitas



(sal gema, etc.) y por el ataque de ciertos minerales asociados a rocas ígneas y metamórficas (sodalita, apatito, etc.).

- Más raramente puede proceder de gases y líquidos asociados a emanaciones volcánicas.
- Los vertidos urbanos e industriales pueden aportar cantidades importantes.
- Es el anión más abundante en el agua del mar, pero puede ser el menos importante de los fundamentales en aguas continentales. No llega a saturar casi nunca y es muy difícilmente alterado por cambio iónico u otro tipo de acción.

Características químicas. Sales muy solubles. Muy estable en disolución y muy difícilmente precipitable. No se oxida ni reduce en aguas naturales. En general va asociado al ion Na^+ , en especial en aguas muy salinas, pero el número de miliequivalentes de ambos iones no siempre es igual.

Concentraciones. Entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de ppm. El agua del mar tiene entre 18 000 y 21 000 ppm. Las salmueras naturales pueden llegar a tener 220 000 ppm (saturación).

Nocividad y toxicidad. Mas de 300 ppm comunican sabor salado al agua de bebe, pero no es perjudicial por lo menos hasta algunos miles de ppm. Es esencial para la vida. Contenidos elevados son perjudiciales para muchas plantas y comunican corrosividad al agua.

➤ Ión Sulfato, SO_4^{2-} .

Procede de:

- Lavado de terrenos formados en condiciones de gran aridez o en ambiente marino.
- Oxidación de sulfuros de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias.
- Disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos.
- Concentración en el suelo de agua de lluvia.
- Las actividades urbanas, industriales y en ocasiones agrícolas pueden aportar cantidades importantes.
- Es afectado por la reducción de sulfatos y puede precipitarse como SO_4Ca y más raramente en forma de SO_4Sr o SO_4Ba ya que a pesar de ser más insolubles precisan de la concurrencia de un ion que es muy escaso. La solubilidad del yeso en agua pura es de 2.095 g/l, pudiendo llegar a 7.30 si el contenido en ClNa es de 131 g/l.

Características químicas. Sales moderadamente solubles a muy solubles, excepto las de Sr (60 ppm) y de Ba (2 ppm). En agua pura el SO_4Ca satura a 1 500 ppm, y puede llegar hasta 7 200 ppm en aguas salinas. En medios reductores con abundante materia orgánica puede sufrir una reducción bacteriana a S o S^{2-} , pero en general es estable. Es difícilmente precipitable químicamente ya que las sales solubles de Sr y Ba son muy escasas en la naturaleza, pero puede separarse de la solución por concentración si existe una evaporación importante.

Concentraciones. Entre 2 y 150 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a 5000 ppm en aguas salinas si existe Ca y hasta 200 000 si está asociado a Mg y Na en ciertas salmueras. El agua del mar contiene alrededor de 3000 ppm.

Nocividad y toxicidad. Las aguas selenitosas (elevado contenido en sulfato) no quitan la sed y tienen sabor poco agradable y amargo. Por sí mismo o si va asociado a Mg o Na en cantidad importante puede comunicar propiedades laxantes. En cantidades elevadas puede ser perjudicial a las plantas. Más de algunos centenares de ppm perjudican a la resistencia a la resistencia del hormigón y cemento.

➤ Iones Bicarbonato y Carbonato, CO_3H^- y CO_3^{2-} .

Proceden de:

- Disolución de CO_2 atmosférico o del suelo.



- Disolución de calizas y dolomías ayudada por el CO_2 y/o ácidos naturales (humicos, oxidación de sulfuros, etc.).
- Hidrólisis de silicatos ayudada por el CO_2 .
- Si en el acuífero no existen aportes de CO_2 (reducción de sulfatos, reducción de hierro y aportes magmáticos) el contenido en carbono disuelto ($\text{CO}_2 + \text{CO}_3\text{H} + \text{CO}_3^{2-}$) permanece constante y muchas veces puede suponerse que el contenido en CO_3H es casi constante ya que es el ion dominante. El agua del mar aporta del orden de 100 ppm. Son fácilmente precipitables por concentración por cambio en la presión parcial de CO_2 o por efecto de ion común.

Características químicas. Existe una profunda relación entre el CO_2 gas, CO_2 disuelto, CO_3H , CO_3^{2-} y pH. Estos iones comunican alcalinidad al agua en el sentido que dan capacidad de consumo de ácido al producir una solución tampón. No son oxidables ni reducibles en aguas naturales. Se pueden precipitar con mucha facilidad como CO_3Ca .

Concentraciones. El ion bicarbonato CO_3H varía entre 50 y 350 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a veces hasta 800 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 100 ppm. El ion carbonato CO_3^{2-} está en concentraciones mucho menores que el CO_3H y si el pH < 8.3 se le considera cero. En aguas alcalinas con pH > 8.3 puede haber cantidades importantes, hasta 50 ppm en algunas aguas naturales. El agua del mar tiene menos de 1 ppm.

Nocividad y toxicidad. No presenta problemas de toxicidad. Las aguas bicarbonatadas sódicas son malas para riego, debido a la fijación del Na en el terreno y creación de un medio alcalino. El equilibrio entre CO_2 , CO_3H , CO_3^{2-} y pH es determinante de la corrosividad o incrustabilidad.

➤ **Ión Nitrato, NO_3^- .**

Procede de:

- Procesos de nitrificación naturales (legumbres).
- Descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera.
- Abonos agrícolas.
- En pequeña proporción del agua de lluvia.
- Muy raramente del lavado de ciertos minerales nitrogenados, emanaciones volcánicas o lavado de suelos antiguos.
- Muy localmente del desarrollo de pozos con explosivos.
- Su origen no es siempre claro. Es relativamente estable pero puede ser fijado a veces por el terreno o ser reducido a N_2 o NH_4^+ en ambientes reductores. Muchas veces es un indicador de contaminación, en cuyo caso suele estar estratificado, dominando las concentraciones mayores en la parte alta del acuífero libre. Si se tiene menos de 10 ppm se considera que el contenido es bajo, aunque en aguas subterráneas no contaminadas es raro superar unas pocas ppm.

Características químicas. Sales muy solubles y por lo tanto es muy difícilmente precipitable. Aunque tiene tendencia a ser estable, aun en medios reductores, puede pasar a N_2 o NH_4^+ y excepcionalmente NO_2^- . La mayoría de compuestos nitrogenados pasan a NO_3^- en medio oxidante, aunque el NH_4^+ puede perderse en parte como N_2 . El terreno puede fijar el NO_3^- , en especial el suelo vegetal.

Concentraciones. Normalmente entre 0.1 y 10 ppm pero en aguas polucionadas puede llegar a 200 ppm y en algún caso hasta 1000 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 1 ppm o menos.

Nocividad y toxicidad. Concentraciones elevadas en agua de bebida puede producir cianosis (metahemoglobinemia o síndrome del "niño azul") en los niños y comunican corrosividad (oxidaciones) al agua y producen interferencias en fermentaciones.



➤ Silice, SiO₂.

Procede de:

- Ataque de silicatos y otras rocas que contienen sílice soluble.
- En muy pequeñas cantidades de la disolución de cuarzo y sus formas alotrópicas
- El valor del pH es muy importante, precipitándose sílice si éste desciende. El CO₂ juega un papel muy importante en su solubilización. Una parte puede estar en forma coloidal.
- Las rocas carbonatadas apenas tienen sílice soluble mientras que las rocas plutónicas pueden llegar a dar hasta 100 ppm, frente a alrededor de 7 ppm las primeras.
- La sílice puede ser un indicador del tipo de terreno atravesado por el agua subterránea y aún mejor de la temperatura del acuífero.

Características químicas. La hidroquímica del silicio no está del todo aclarada pero se cree que la mayoría de la sílice está como SiO₂H₄ en parte disuelta y en parte coloidal y sólo una pequeña parte está ionizada (SiO₃H₃⁻) a pH normales, las aguas fuertemente básicas pueden tener cantidades importantes de sílice iónica, pero son muy raras en la naturaleza. La sílice iónica contribuye algo a la alcalinidad del agua. El CO₂ juega un importante papel al evitar que el pH suba, limitando así la solubilidad de la sílice. El cuarzo y sus formas alotrópicas son muy poco solubles pero la sílice amorfa lo es mucho más (50 ppm a 0°C, 160 ppm a 25°C, y 400 ppm a 100°C en agua pura).

Concentraciones. La mayoría de las aguas naturales tienen entre 1 y 40 ppm en SiO₂ pueden llegar hasta 100, en especial en aguas bicarbonatadas sódicas. En aguas muy básicas se puede llegar a 1000 ppm.

Nocividad y toxicidad. El mayor inconveniente está relacionado con su incrustabilidad en calderas y calentadores.

Cationes y sustancias catiónicas.

➤ Ión Sodio, Na⁺

Procede de:

- Ataque de feldespatos, feldespatoides y otros silicatos.
- Lavado de sedimentos de origen marino y cambio de bases con arcillas del mismo origen
- Mezcla con agua del mar.
- Localmente de la disolución de sal gema o sulfato sódico natural (sales evaporitas)
- Raras veces de emanaciones y fenómenos relacionados con procesos magmáticos
- Contaminación urbana e industrial.
- Concentración del agua de lluvia.
- Es muy soluble y es el catión más abundante en el agua del mar. Es muy afectado por el cambio de bases.

Características químicas. Solubilidad muy elevada y muy difícil de precipitar. Es afectado fácilmente por el cambio de bases. Suele ir asociado al ion Cl⁻ aunque no siempre sucede así. Las aguas naturales con elevados contenidos en Na⁺ suelen tener contenidos elevados en F⁻.

Concentraciones. Entre 1 y 150 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de ppm. El agua del mar tiene alrededor de 10 000 ppm, las salmueras naturales pueden llegar a tener 100 000 ppm, siendo un límite que rara vez se sobrepasa el de 500 meq/l (≈ 110 000 ppm).

Nocividad y toxicidad. Las aguas con concentraciones elevadas en sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la permeabilidad del suelo; son especialmente nocivas si las concentraciones de Ca y Mg son bajas. Aguas con contenidos elevados en CO₃HNa originan problemas de espumas en calderas.



➤ Ión Potasio, K^+

Procede de:

- Ataque de la ortosa y otros silicatos (micas, arcillas, etc.).
- Localmente de la disolución de sales potásicas naturales (silvinita, carnalita, etc.).
- En pequeña cantidad de aportes del agua de lluvia.
- En ocasiones procede de contaminación industrial, minera y agrícola (abonos).
- Tiende a ser fijado irreversiblemente por el terreno durante la formación de arcillas por lo que rK/rNa es mucho menor que 1, excepto en aguas muy diluidas, en las que ese valor puede llegar a ser 1.

Características químicas. Solubilidad muy elevada y difícil de precipitar. Es afectado fácilmente por el cambio de bases y es absorbido de forma muy poco reversible por las arcillas en formación (paso de montmorillonita a illita), para formar parte de su estructura, circunstancia que lo diferencia notablemente del Na^+ . Por ello las aguas naturales, a pesar de la mayor abundancia de K en muchas rocas, tienden mucho menos K^+ que Na^+ excepto en las muy diluidas.

Concentraciones. Entre 0.1 y 10 ppm en aguas dulces. Extraordinariamente se pueden tener algunos cientos de ppm y sólo muy raramente se puede tener salmueras de hasta 100 000 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 400 ppm.

Nocividad y toxicidad. No presenta problemas especiales a las concentraciones habituales y es un elemento vital para las plantas.

➤ Ión Calcio, Ca^{++}

Procede de:

- Disolución de calizas, dolomías, yeso y anhidrita.
- Ataque de feldespatos y otros silicatos cálcicos.
- Disolución de cemento calcáreo de muchas rocas, concentración del agua de la lluvia.
- Está frecuentemente en estado de saturación y su estabilidad en solución depende del equilibrio $CO_2 - CO_3H^- - CO_3^{--}$.
- Puede precipitarse con facilidad y es muy afectado por el cambio iónico.

Características químicas. Sales de moderadamente solubles a muy solubles. Es muy fácil de precipitar como CO_3Ca . Su química va muy asociada a la de los iones CO_3H^- y CO_3^{--} en muchas aguas naturales, pudiéndose precipitar y disolver con facilidad al cambiar el pH o la presión parcial de CO_2 . Puede ser afectado por cambios de bases.

Concentraciones. Entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a 600 ppm en aguas selenitosas. El agua del mar contiene alrededor de 400 ppm. Excepcionalmente se puede tener 50 000 ppm en salmueras de Cl_2Ca .

Nocividad y toxicidad. El mayor inconveniente va asociado al aporte de dureza y producción de incrustaciones.

➤ Ión Magnesio, Mg^{++}

Procede de:

- Disolución de dolomías y calizas dolomíticas.
- Ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos.
- Localmente del lavado de rocas evaporitas magnésicas (carnalita, kaiserita, etc.).
- Mezcla con agua del mar.
- Contaminación industrial y minera.



- Aunque se disuelve más lentamente es más soluble que el Ca y tiende a permanecer en solución cuando este se precipita. Es afectado por el cambio iónico.

Características químicas. Propiedades similares a las del ion calcio pero más solubles y algo más difícil de precipitar.

Concentraciones. Entre 1 y 100 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a veces a algunos miles de ppm en aguas salinas o salmueras. El agua del mar contiene 1200 ppm.

Nocividad y toxicidad. Propiedades laxantes y da sabor amargo al agua de bebida si hay algunos centenares de ppm. Contribuye a la dureza del agua y además a pH elevado puede dar $Mg(OH)_2$ incrustante.

➤ Iones relacionados con el Hierro.

Procede de:

- Ataque de silicatos ferríferos.
- Ataque de sulfuros y óxidos de hierro.
- Ataque de la mayoría de las rocas sedimentarias.
- Muy lentamente y con carácter local procede del entubado de los pozos
- Su estabilidad depende fundamentalmente del potencial redox; se solubiliza y precipita con facilidad. En medios oxidantes sólo se tienen cantidades mínimas de Fe disuelto.

Características químicas. Su química es relativamente compleja pues puede existir en los estados de valencia +2 y +3. La estabilidad de los iones Fe^{2+} , Fe^{3+} , $Fe(OH)^+$, $Fe(OH)^+$, en relación con el $Fe(OH)_3$ y $Fe(OH)_2$ precipitados o coloidales, depende del pH, Eh y composición de la solución. Ciertos microorganismos promueven medios reductores que favorecen la formación de Fe^{2+} , mientras otros utilizan la energía del paso Fe^{2+} a Fe^{3+} en sus procesos vitales y dan lugar a precipitaciones gelatinosas, estos crecimientos bacterianos se favorecen en la oscuridad y en aguas con exceso de O_2 y abundante CO_2 . El Fe puede estabilizarse con compuestos orgánicos tales como los ácidos oxálico, tartárico, cítrico y también con polifosfatos.

Concentraciones. Fe^{2+} entre 0 y 10 ppm, siendo de menos de 0.5 ppm en aguas aireadas. Con pH entre 5 y 8 rara vez se llega a 50 ppm. En aguas muy ácidas se puede llegar a 100 ppm en $Fe^{2+} + Fe^{3+}$. Las aguas alcalinas sólo tienen muy pequeñas cantidades de Fe^{2+} o $Fe(OH)^+$.

Nocividad y toxicidad. Produce manchas de herrumbre y depósitos orgánicos fangosos con $Fe(OH)_3$ y es en general molesto en aguas industriales. Puede originar incrustaciones duras. Más de 5 ppm pueden ser tóxicas para las plantas. Más de 0.5 ppm son nocivas o molestas en general.

Principales gases disueltos.

➤ Anhídrido carbónico, CO_2

Procede de:

- Disolución de gases del terreno no saturado
- Descomposición y oxidación de materia orgánica en varios procesos como reducción de sulfatos, reducción de Fe, etc.
- Disolución de gases del aire por la lluvia y el agua superficial.
- A veces procede de emanaciones magmáticas.
- Juega un papel importante en el comportamiento hidrogeoquímico de las aguas subterráneas.

Características químicas. Es un gas relativamente soluble y que al hidrolizarse produce ácido carbónico parcialmente disociado. Su papel es muy importante ya que determina en gran manera el comportamiento químico de un agua frente a muchos minerales, como la calcita, dolomita, feldespatos, etc.



Concentraciones. Frecuentemente se sitúa entre 1 y 30 ppm, correspondiendo los valores más bajos a aguas en contacto fácil con la atmósfera. En acuíferos profundos en los que existe generación de CO₂ (oxidación de materia orgánica, aportes volcánicos, etc.) y elevadas presiones, pueden existir aguas con contenidos en CO₂ de hasta 1500 ppm (aguas carbónicas naturales) que se mantiene si esa agua aflora rápidamente. La presión parcial de CO₂ en la atmósfera varía entre 0.00033 y 0.00044 atm pudiendo variar entre 0.001 y 0.1 en el aire que llena los poros del suelo agrícola.

Nocividad y toxicidad. Las aguas con un exceso de CO₂ son agresivas y las que pierden CO₂ pueden convertirse en incrustantes. Aguas con más de 20 ppm de CO₂ libre pueden ser agresivas para el concreto.

➤ Oxígeno disuelto, O₂

Procede de:

- Disolución de aire por el agua de lluvia y las aguas superficiales.
- Disolución de gases del terreno no saturado.
- Procesos de fotosíntesis en el seno de aguas superficiales.
- Juega un papel muy importante en los procesos redox. El contenido de oxígeno disuelto en las aguas subterráneas profundas, es pequeño o nulo debido a que se consume sin posibilidad de renovación; no obstante existen excepciones, como en las aguas profundas en las formaciones volcánicas de las Islas Canarias.

Características químicas. Produce un medio oxidante y juega un papel de gran importancia en la solubilización o insolubilización de iones que cambian con facilidad de valencia así como en la actividad de los microorganismos. Su ausencia produce un medio llamado anaerobio. Se consume con facilidad si existen sustancias oxidables como materia orgánica, Fe⁺⁺, NH₄⁺, NO₂⁻, etc., en especial por acción biológica.

Concentraciones. La concentración a saturación del oxígeno en el agua en contacto con el aire es del orden de 10 ppm. Previamente a la infiltración el agua puede estar incluso sobresaturada en oxígeno pero en el terreno el oxígeno se consume y su renovación es difícil o imposible. La mayoría de las aguas subterráneas tienen entre 0 y 5 ppm, frecuentemente por debajo de 2 ppm.

Nocividad y toxicidad. El mayor problema que presenta el oxígeno disuelto en el empleo del agua es que produce corrosividad. Su ausencia puede ser origen de malos gustos (fermentaciones anaerobias).

Aniones y sustancias aniónicas menores más importantes.

➤ Fluoruro, F⁻

Características químicas. Solubilidad en general limitada y al parecer contribuye ligeramente a la alcalinidad del agua pues se hidroliza ligeramente.

Concentraciones. Frecuentemente entre 0.1 y 1 ppm, pudiendo llegar a veces hasta 10 y raramente a 50 en aguas muy sódicas con muy poco Ca. El agua del mar tiene entre 0.6 y 0.7 ppm. Las aguas de zonas áridas pueden tener cantidades elevadas. El Ca limita la concentración en F⁻.

Nocividad y toxicidad. Parece jugar un papel muy importante en la conservación de la dentadura, creando problemas cuando está tanto por exceso como por defecto. La concentración óptima parece ser de 1 ppm, pero depende de la temperatura.

➤ Bromuro, Br⁻

Características químicas. Su comportamiento es similar al del ion Cl⁻. Tiene interés en el estudio del origen de aguas saladas.

Concentraciones. En general menos de 0.01 ppm en aguas dulces. El agua del mar tiene 0.5 ppm. En las aguas dulces y agua marina es $r\text{Cl} / r\text{Br} \approx 675$ ($r = \text{meq/l}$).



Nocividad y toxicidad. En las concentraciones usuales no ocasiona ningún problema.

➤ **Iones derivados del Boro**

Características químicas. Se encuentra disuelto como BO_3H_3 parcialmente disociado a BO_3H_2^- . Contribuye algo a la alcalinidad.

Concentraciones. En general menos de 0.1 ppm pero a veces puede llegar a 10 y excepcionalmente a 30. El agua del mar contiene 4.6 ppm en B. Puede ser elevado en aguas antiguas y termales.

Nocividad y toxicidad. En pequeñas cantidades ya es nocivo para las plantas pero no en el agua de bebida.

➤ **Sulfuro y Gas sulfhídrico, S^{2-} y H_2S**

Características químicas. Fácilmente oxidables a S, SO_3^{2-} o SO_4^{2-} y pueden ser depositados en el terreno ya que forman muchas sales poco solubles. Son características de medios reductores, pero no siempre están presentes en los mismos. El S^{2-} se hidroliza con facilidad a HS^- y H_2S , estando en equilibrio con fase gas y el H_2S se hidroliza a HS^- y S^{2-} .

Concentraciones. Generalmente muy por debajo de 1 ppm, aunque en aguas de medios muy reductores con reducción de sulfato, se puede llegar a veces hasta a 100 ppm. Extraordinariamente el contenido en SH_2 puede llegar a 1000 ppm en aguas relacionadas con yacimientos de petróleo.

Nocividad y toxicidad. Comunica muy mal olor, fácilmente detectable incluso a 1 ppm o menos. Es corrosivo, en especial para aleaciones de Cu.

➤ **Fosfato, PO_4^{3-}**

Características químicas. Aunque presente sales solubles, la mayoría lo son muy poco y en general se precipita como $(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$. Se hidroliza con facilidad y contribuye a la alcalinidad del agua. La presencia de Ca limita su contenido y el CO_2 disuelto lo favorece.

Concentraciones. En general entre 0.01 y 1 ppm pudiendo llegar a 10 ppm y excepcionalmente a 50.

Nocividad y toxicidad. En las concentraciones usuales, no origina problemas. Es esencial en el ciclo vital de los seres vivientes, pero lo adquieren por otros medios.

Cationes y sustancias catiónicas menores más importantes.

➤ **Ión Manganeseo, Mn^{++}**

Características químicas. El manganeseo tiene un comportamiento similar al Fe, presentando como éste los estados de valencia +2 y +3, además de la +4, que sólo existe como MnO_2 insoluble. En general está en forma de Mn^{++} que se oxida fácilmente a MnO_2 . Puede formar complejos orgánicos estables tal como sucede con el hierro.

Concentraciones. En general por debajo de 0.2 ppm, rara vez por encima de 1 ppm. Es más abundante en aguas ácidas.

Nocividad y toxicidad. Al oxidarse forma manchas negruzcas y favorece el crecimiento de ciertas bacterias.



➤ **Ión Amonio y Amoníaco Disuelto, NH_4^+ y NH_3**

Características químicas. Son oxidados con gran facilidad a N_2 , NO_2^- , NO_3^- y son fácilmente retenidos por el terreno por cambio de bases. Se hidrolizan, $(\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+)$, existiendo un

equilibrio entre ambos. Si existe gran cantidad (rara vez) pueden actuar como tampón. Puede coexistir con Fe^{2+} pero no con NO_3^- en cantidades importantes.

Concentraciones. En general menos de 0.1 ppm pero en casos muy excepcionales puede llegar a 400 ppm. El agua del mar tiene entre 0.005 y 0.05 ppm, a veces hasta 0.35.

Nocividad y toxicidad. En las concentraciones usuales no es origen de problemas pero a concentraciones mayores puede llegar a dar olor amoniacal. Suele ser índice de contaminación.

➤ **Ión Estroncio, Sr^{++}**

Características químicas. Es similar al Ca^{++} pero sus sales son menos solubles. Aunque contribuye a la dureza del agua, no tiene importancia por ser relativamente escaso.

Concentraciones. En general entre 0.01 y 1 ppm, a veces hasta 20. El agua marina tiene 13 ppm. Algunas salmueras pueden llegar a tener, extraordinariamente 1000 ppm.

Nocividad y toxicidad. En las bajas concentraciones normales no es nocivo ni molesto.

➤ **Ión Litio, Li^+**

Características químicas. Sales muy solubles y es poco retenido en el terreno. En general es más cedido que retenido en los cambios de bases.

Concentraciones. Entre 0.001 y 0.5 ppm, a veces hasta 1 ppm pudiendo llegar en algunas salmueras hasta 10 ppm.

Nocividad y toxicidad. En las bajas concentraciones usuales no es nocivo ni crea problemas.

➤ **Iones derivados del Aluminio (Alúmina, Al_2O_3).**

Características químicas. El aluminio es muy difícil de poner en solución y queda fuertemente retenido en las arcillas. Es fácilmente hidrolizable y anfótero. Solo existe en cantidades importantes como Al^{+++} en aguas muy ácidas o como Al_2O_4^- o $\text{Al}_2\text{O}_3\text{H}^-$ en aguas básicas, en cuyo caso puede producir alguna alcalinidad. Puede estar en forma coloidal como $\text{Al}_2\text{O}_3\text{H}_2$.

Concentraciones. En general entre 0.005 y 0.3 ppm pudiendo llegar muy extraordinariamente a 100 ppm en aguas muy ácidas.

Nocividad y toxicidad. No presenta problemas especiales.

➤ **Ión Uranilo, UO_2^{++}**

Características químicas. Es ligeramente soluble como tal o formando complejos. En medios reductores pasa a U^{4+} y se precipita con facilidad. Es muy ligeramente radiactivo. Aguas muy ácidas pueden tener cantidades importantes y también aguas alcalinas bicarbonatadas, pues forma un complejo soluble.

Concentraciones. En general menos de 0.001 ppm. El agua del mar tiene 0.002 ppm. Es muy raro encontrar más de 0.01 ppm.



Nocividad y toxicidad. No presenta problemas a las concentraciones usuales, pero sí en aguas con contenidos algo elevados, ya que es química y radiactivamente tóxico.



CAPÍTULO II. ORIGEN, USOS Y TOXICIDAD DE METALES PESADOS, DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS Y POLIAROMÁTICOS.

2.1 ORIGEN, USOS Y TOXICIDAD DE:

2.2 METALES PESADOS

Aluminio (Al). Origen. Es el tercer elemento (y el primer metal) más abundante en la corteza terrestre, de la que constituye el 7.5 % en peso, formando parte de minerales, rocas y arcillas. Esta distribución es la causa de la presencia del aluminio en casi todas las aguas naturales como sal soluble, coloide o compuesto insoluble. En algunas regiones, la importancia de estas partículas es que dan al agua cierta turbidez y un aspecto poco agradable para el consumo.

Usos. Por su baja densidad, su solidez y su resistencia a la corrosión, el aluminio y sus aleaciones tienen múltiples usos: construcción de aviones, automóviles, utensilios de cocina, envases, papel de aluminio, accesorios para la industria química, cables de alta tensión y en pares termoelectrónicos. Su capacidad para reflejar la luz se utiliza para espejos de telescopios y en faros. Las propiedades clarificantes de las sales de aluminio siguen siendo muy utilizados actualmente para los servicios de abastecimiento de la mayoría de los países.

Toxicidad. Datos epidemiológicos y fisiológicos disponibles no parecen corroborar la idea de que el aluminio tiene una función causal en la enfermedad de Alzheimer.

Arsénico (As). Origen. Está muy repartido en la biosfera: las rocas ígneas contienen de 1 a 9 mg/kg, los fosfatos naturales 20 mg/kg; los carbones 45 mg/kg y las piritas de 5 a 6 mg/kg. Su origen es muy discutido (erosión natural, lavado de los sedimentos, aportes a partir de las zonas de fracturas submarinas, etc.). La existencia de arsénico en el medio ambiente también puede deberse a la combustión del carbón, así como la presencia de arsénico en los fosfatos utilizados en los abonos o en los detergentes (las aguas de lavandería pueden tener algunos microgramos por litro). El arsénico puede existir en estado trivalente o pentavalente y en forma de compuestos orgánicos. Es probable que el arsénico esté en el estado pentavalente en el agua de beber. El presente en el agua procede de la disolución de minerales, de efluentes industriales y de la atmósfera; en algunas zonas, las concentraciones que existen en las aguas subterráneas son elevadas como resultado de la erosión.

Usos.

- Materia prima para la fabricación de insecticidas, raticidas, plaguicidas, pesticidas y venenos.
- Desecho en la fabricación de cerámica, vidrio, pinturas y electrónicos.
- Residuo de la minería.

Toxicidad. El arsénico actúa en el organismo bloqueando los grupos tial, ocasionando perturbaciones en los procesos de oxidorreducción celular y trastornos del metabolismo glúcido-lipídico. La intoxicación crónica se caracteriza por trastornos digestivos, síndromes melanodérmicos y neurológicos. Carcinógeno para los seres humanos por el Centro Internacional de Investigación sobre el Cáncer (CIIC), consumo de altas concentraciones en agua provoca cáncer de piel, hígado, riñones, habiendo trastornos en todo el cuerpo.

Bario (Ba). Origen. Es escaso en la corteza terrestre representando sólo un 0.045 % de su peso. No se encuentra nativo en la naturaleza, siendo sus minerales principales la witherita (carbonato $BaCO_3$) y baritina (sulfato $BaSO_4$).

Usos.

- Se utiliza en la industria (fotografía, cristalería, pinturas) y en la agricultura (rodenticida, insecticida).
- Se emplea para eliminar gases de las válvulas electrónicas y para eliminar oxígeno en algunos procesos metalúrgicos. Aleado con el Níquel se usa en bujías de encendido.



Toxicidad. Los trastornos que producen su ingestión, inhalación o absorción pueden afectar a corazón, vasos sanguíneos y nervios. Un estudio epidemiológico ecológico llegó a la conclusión de que existe una relación entre la mortalidad por enfermedades cardiovasculares y el contenido de bario del agua bebida. Sin embargo, el estudio epidemiológico analítico con la misma población no confirmó esos resultados.

Cadmio (Cd). Origen. Los minerales que contienen cadmio se encuentran en partes específicas del mundo, si bien se hallan trazas de este metal uniformemente distribuidas en la corteza terrestre. Aunque es poco frecuente, la forma predominante en que se encuentra el mineral de cadmio es la grenoquita (blenda de cadmio), o sea, el sulfuro de cadmio; esta forma suele asociarse con los depósitos de esfalerita (sulfuro de zinc).

Usos.

- Se utiliza en la industria siderúrgica (aleaciones y soldaduras) en revestimientos metálicos, como pigmentos, como estabilizadores en los materiales plásticos y en baterías.
- Se utiliza en refinerías, pinturas y tuberías galvanizadas.

Toxicidad. Los primeros efectos tóxicos se deben a irritación local. Después de su ingestión se producen náuseas, vómitos, sialorrea, diarrea y cólicos abdominales. Los efectos tóxicos de la exposición prolongada al cadmio actúan sobre el riñón y el hígado. Se manifiesta ablandamiento de huesos, hipertensión arterial, ardores en pies, **es un carcinógeno comprobado.**

Cianuros. Origen. Los cianuros se encuentran dondequiera que haya vida e industria; existen tanto las formas inorgánicas como orgánicas. Los cianuros forman parte de los sistemas vitales, sobre todo como intermediarios metabólicos. Entre las formas más comunes del cianuro se encuentran el cianuro de hidrógeno, las sales de cianuro que se disuelven fácilmente en el agua y los complejos de metalocianuro.

Usos.

- Se emplea en la industria (en las instalaciones de cianuración y de galvanoplastia).
- Se emplea en la fabricación de acrilonitrilo, de adiponitrilo y del metilmetacrilato.
- Para la extracción del oro y plata.
- Para la producción de acero.
- En la elaboración de ciertos intermediarios en la síntesis química y petroquímica.

Toxicidad. Sus efectos no son de consecuencias graves (2.9-4.7 mg/l) para las personas, debido a que el sistema de desintoxicación del cuerpo humano es sumamente eficiente y en el el ion de cianuro se convierte en ion tiocinato, que no es relativamente tóxico a través del sistema enzimático de rodaneso y tiosulfato.

Cobre (Cu). Origen. Se encuentra libre en la naturaleza, constituye en peso el 0.01 % de la corteza terrestre. Se encuentra formando parte de muchos compuestos naturales: cuprita (Cu_2O), bornita (Cu_3FeS_3), calcopirita (CuFeS_2), calcosina (Cu_2S), azurita ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) y malaquita ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$). Puede encontrarse en forma de trazas inferiores a 1 mg/l en ciertas aguas naturales. Este metal proviene habitualmente de la corrosión de las tuberías.

Usos.

- Se emplea en la industria y tratamientos agrícolas.
- Se emplea en la construcción de calderas, alambiques, concentradores, monedas, etc.
- Se emplea en la reproducción galvanoplástica de medallas, grabados, etc.

Toxicidad. Concentración > 3.0 mg/l: irritación gástrica aguda. En los adultos que padecen degeneración hepatolenticular, por la ingestión prolongado puede provocar cirrosis hepática.



Cromo (Cr). Origen. El cromo no se haya libre en la naturaleza, pero combinado constituye el 0.033% en peso de la corteza terrestre. Su mineral más abundante es la cromita (cromito de hierro (II), $Fe(CrO_2)_2$), también se presenta en forma de crocoita (cromato de plomo $PbCrO_4$).

Usos.

- En los procesos industriales se utilizan mucho las sales de cromo, y pueden pasar al suministro de agua a través de los desechos tóxicos.
- En las industrias químicas son principalmente los bicromatos los que más se emplean.
- Se utiliza en aleaciones, en revestimiento galvánico (cromado), en agentes oxidantes, como inhibidor de la corrosión.
- En la fabricación de compuestos de cromo como son: los pigmentos y en las industrias textiles, de cerámica, de vidrio y fotografía.

Toxicidad. Para la concentración de 0.05 mg/l se considera poco probable que presente riesgos importantes para la salud. Es un tóxico muy fuerte si se inhala, pudiendo producir cáncer de pulmón en las personas expuestas a él. A plazos más largos genera cáncer estomacal e irritación de los intestinos.

Hierro (Fe). Origen. Es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, de la que representa el 4.7 % en peso. Su abundancia en la Tierra en su conjunto es aún mucho mayor, ya que el núcleo del planeta está constituido esencialmente por hierro fundido. Compuestos naturales del Fe son: el oligisto o hematites roja (Fe_2O_3), la hematites parda o limonita ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$), la siderita ($FeCO_3$), la magnetita (Fe_3O_4), las piritas (FeS_2) por mencionar algunos. Puede estar presente en el agua de beber en los estados bivalente y trivalente (ferroso y férrico), debido a la utilización de coagulante de hierro o a corrosión de las tuberías de acero y hierro fundido durante el proceso de distribución.

Usos.

- Se emplea en usos industriales.
- Se emplea en las industrias alimentarias, azucareras, cervecerías y bebidas gaseosas.

Toxicidad. Desde un punto de vista fisiológico, el hierro en el agua no presenta ningún problema. El hierro solamente se absorbe cuando existe una diferencia corporal de este elemento. La ingesta de hierro a dosis terapéuticas suele producir trastornos gástricos de tipo irritativo, gastritis aguda, a veces necrótica y hemorragias. Cuando se trata de ion ferroso puede llegar a originarse colapsos vasculares a veces letales. El sulfato de hierro, cuando se absorbe a dosis elevadas, produce trastornos gastrointestinales, así como taquicardia e incluso colapso cardiovascular y respiratorio. También puede producirse estenosis del píloro, con evolución fatal después de transcurrido cierto tiempo.

Manganeso (Mn). Origen. El manganeso no existe libre en la naturaleza y combinado constituye el 0.08% de la corteza terrestre. Junto a la pirolusita (MnO_2), son compuestos naturales importantes: la rodocrosita ($MnCO_3$), la braunita (Mn_2O_3), la hausmonita (Mn_3O_4), la manganita ($Mn_2O_3 \cdot H_2O$) y la blenda de manganeso (MnS).

Cuando el manganeso está presente en las aguas superficiales naturales, puede estar en forma disuelta o suspendida. El agua subterránea anaerobia suele obtener niveles elevados de manganeso disuelto.

Usos.

- En la metalurgia proviene de que forma parte de aleaciones tales como los latones y bronce al manganeso, la manganina y el duraluminio.
- En siderurgia se emplea como desulfurante y desoxidante.
- Se emplea en la composición de aceros indeformables, aceros elásticos y aceros inoxidables.
- En un porcentaje de 10-18 %, en el acero al manganeso, que por su dureza y resistencia al desgaste se emplea para cajas de caudales, rieles ferroviarios, maquinaria, armas y herramientas.



Toxicidad. Si se ingiere en grandes dosis es un veneno que afecta fundamentalmente al sistema nervioso central. Ocasiona cirrosis hepática. En cuanto a la toxicología, el manganeso tiene una actividad *pluritisular*. Podemos citar una patología neurológica denominada *parkinson mangánico* de instalación lenta e insidiosa, y que evoluciona en su forma típica, lentamente, durante meses o años hasta un estado verdaderamente grave.

Mercurio (Hg). Origen. Es escaso en la corteza terrestre de la que representa un 4×10^{-5} % en peso. Ocasionalmente se presenta en estado libre, pero su mena más importante es el cinabrio (HgS). Es un metal muy brillante y denso, de color gris claro, y es el único metal líquido a temperatura ordinaria. Desprende vapores tóxicos. Es bastante inerte, pero se disuelve en ácido nítrico y en sulfúrico concentrado. El mercurio se desprende naturalmente de la corteza terrestre (evaporación, erosión de volcanes, del orden de 10^5 t/año). El mercurio y sus derivados no representan más que el 10^{-7} % de las rocas ígneas. Se encuentra mercurio en su forma orgánica en las aguas superficiales y subterráneas en concentraciones inferiores a 0.0005 mg/l.

Usos.

- Se emplea en aparatos de medición barómetros, manómetros y termómetros.
- Se utiliza en la industria del cloro y de la sosa y como catalizador en la producción del acetaldehído.
- En la fabricación de los aparatos eléctricos y pinturas marinas.
- En fungicidas para la agricultura.
- En actividades industriales: refinarias, fábricas de cementos, siderúrgicas, tratamiento de los fosfatos, refinado del mercurio.
- Entre los compuestos del mercurio, el cloruro (llamado calomelanos) y el yoduro de mercurio (II) se emplean en fotografía como reforzadores de imagen. El cloruro se emplea como purgante, antihelmíntico y diurético y fue usado como desinfectante y para combatir la sífilis.

Toxicidad. Origina trastornos neurológicos y renales asociados respectivamente a los compuestos orgánicos e inorgánicos. Asimismo, se ha señalado que el mercurio provoca efectos gonadotóxicos, mutagénicos y alteraciones del metabolismo del colesterol.

Plomo (Pb). Origen. Es muy raro en la naturaleza en estado nativo, pero combinado se encuentra concentrado en yacimientos. Constituye un 2×10^{-5} % en peso de la corteza terrestre. Su mena más importante es la galena (PbS), otros minerales del plomo son la cerusita (PbCO₃) y la anglesita (PbSO₃). El plomo en el suministro de agua puede ser de origen industrial, minero y de descargas de hornos de fundición o de cañerías viejas de plomo.

Usos.

- Se emplea en las plantas de fundición.
- En la elaboración de instalaciones sanitarias domésticas.
- Se emplea para canalizaciones y revestimientos de tanques industriales.
- Por su opacidad a los rayos X y Gamma, en pantallas y muros de protección en radiología y reactores nucleares.
- Se usa principalmente para la producción de acumuladores de plomo-ácido, soldaduras y aleaciones.

Toxicidad. La intoxicación aguda provoca efectos locales en la boca como notable astringencia, sed y regusto metálico acompañado de náusea, dolor abdominal y vómito. Entre los síntomas agudos del sistema nervioso central están peresias, dolor y debilidad muscular, así como una crisis hemolítica aguda, que causa anemia y hemoglobinuria intensa. Daña los riñones y se advierten oliguria y cambios en la orina. La intoxicación crónica provoca saturnismo o plumbismo, puede dividirse en 6 categorías: gastrointestinales, neuromusculares, del sistema nervioso central, hematológicos, renales y de otra índole. El plomo es un tóxico que se acumula en el esqueleto. Las lactantes, los niños hasta los 6 años de edad y las mujeres embarazadas son las más vulnerables a sus efectos en la salud.



Zinc (Zn). Origen. El zinc no existe nativo en la naturaleza, pero combinado constituye el 0.02 % de la corteza terrestre. Sus compuestos naturales más importantes son: la blenda o esfalerita (ZnS), la calamina ($Zn_2SiO_4 \cdot H_2O$), la smithsonita ($ZnCO_3$), la cincita (ZnO) y la franklinita, un óxido mixto de zinc, manganeso y hierro. La forma más común de la introducción del zinc en el suministro doméstico de agua es por deterioro del hierro galvanizado y deszincado del latón. El zinc en el agua también puede tener su origen en la contaminación por residuos industriales.

Usos.

- Se emplea para planchas, recipientes y tuberías.
- Se emplea para cubrir tejados y para fotograbado.
- Se utiliza para el galvanizado del hierro.
- Se emplea en pilas eléctricas como ánodo y entra en la composición de aleaciones importantes como latones, bronces y plata alemana.
- Entre sus compuestos, su óxido (ZnO) se usa como pigmento en pinturas (blanco de zinc o de China), catalizador en reacciones de química orgánica y por sus propiedades antisépticas, en pomadas.
- El cloruro (Zn_2Cl) se utiliza para proteger metales de la corrosión y la madera contra la humedad.
- El sulfato heptahidratado ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) se emplea como mordiente.
- Y el sulfuro (ZnS), se usa como pigmento.

Toxicidad. Provoca agotamiento gastrointestinal y diarrea, daño pancreático y anemia.

2.3 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS

Benceno (C_6H_6) Origen. Es un líquido incoloro, que da vapores tóxicos de olor característico. Es algo menos denso que el agua y hierve a $80.1^\circ C$. Fácilmente inflamable, arde con llama fuliginosa y sus vapores forman mezclas explosivas con el aire. Es insoluble en agua y soluble en disolventes orgánicos como alcohol, acetona o éter, siendo un buen disolvente de sustancias no iónicas: grasas, caucho, resinas. Por tratarse de un hidrocarburo no saturado, puede dar compuestos de adición, pero sus reacciones más importantes y características son las de sustitución. El benceno está presente en el alquitrán de hulla, del que puede separarse por destilación fraccionada, pero actualmente se obtiene sobre todo a partir del petróleo por reformado catalítico.

Usos.

- Se usa ampliamente en la industria química y es un componente menor de las gasolinas.
- Se utiliza en las industrias del zapato, del cuero, y en la pintura.
- Tiene aplicación como disolvente y en la obtención de numerosos productos intermedios, entre ellos, ciclohexano, fenol, nitrobenzeno, estireno, anhídrido maleico, anilina.

Toxicidad. Según la concentración y duración de la exposición, la inhalación de vapores de benceno puede provocar trastornos en el sistema nervioso central que se manifiestan en neuropatía (mareos), dolores de cabeza, náuseas, somnolencia, perturbaciones psíquicas con estados de excitación y convulsión que finalizan en desvanecimiento y parálisis del centro respiratorio, convulsiones, coma y muerte. El benceno puede ser adsorbido a través de la piel. Localmente, puede irritar los ojos, la piel y las vías respiratorias superiores. Si llega a los pulmones en forma líquida, puede provocar edema pulmonar y hemorragia. **Está probado que el benceno es carcinógeno, específicamente, un leucemógeno (causante de leucemia).**

Etilbenceno ($C_6H_5(C_2H_5)$) Origen. Es un isómero de los xilenos, es un líquido incoloro. No es persistente en agua, con una vida media (debido a la volatilización) de menos de 2 días. El 99.5 % termina en el aire y el 0.5 % en el agua.

Usos.

- Se emplea en síntesis orgánica, como disolvente y en la fabricación de estireno.



Toxicidad. Exposición a alta concentración puede causar aturdimiento, mareo, desvanecimiento. Muy altos niveles pueden causar problemas respiratorios, daños al hígado, parálisis y la muerte. Tóxico por inhalación, ingestión y absorción cutánea. **Cancerígeno no contrastado.**

Tolueno ($C_6H_5 \cdot CH_3$) Origen. Es un líquido incoloro, que da vapores tóxicos. Se obtiene en el reformado catalítico del petróleo y en la destilación fraccionada del alquitrán de hulla. Industrialmente no es puro y contiene trazas de benceno y sus derivados.

Usos.

- Se emplea como disolvente, para elevar el índice de octano en gasolinas y en la producción de diversos derivados orgánicos (detergentes, plásticos de poliuretano, explosivos).
- Gasolina de aviación y mezclas de alto octanaje.
- Se mezcla bien con la mayoría de disolventes orgánicos y con los aceites minerales y vegetales.
- Materia prima para fenol y benceno.

Toxicidad. Tóxico por ingestión, inhalación y absorción cutánea. Puede producir malformaciones (mutagénico). Si produce cáncer requiere un estudio más profundo.

Xileno ($C_6H_4(CH_3)_2$) Origen. Esta presente en pequeña proporción en el alquitrán de hulla y también puede obtenerse por reformado catalítico del petróleo.

Usos.

- Se emplea como disolvente y para elevar el índice de octano en gasolinas.
- Se usa en la producción de anhídrido ftálico, que se emplea en la producción de plásticos reforzados de poliéster y fibras de poliéster.

Toxicidad. La toxicidad aguda de los xilenos absorbidos por vía oral es baja, no se han hallado pruebas convincentes de su actividad teratogénica. **No se ha comprobado que sea carcinógeno.**

Metil Terbutil Eter (MTBE) ($CH_3OC(CH_3)_3$) Origen. El MTBE se produce industrialmente mediante procesos químicos de síntesis a partir del metanol e isobutileno, a diferencia de las gasolinas que son producidas por la refinación del petróleo. El MTBE se adiciona a las gasolinas hasta el momento en que éstas son formuladas para su distribución. Es un líquido incoloro, con un olor similar al del aguarrás. Se le considera químicamente estable; es volátil, inflamable y explosivo. El MTBE es cerca de 30 veces más soluble en agua en comparación con el benceno y casi 100 veces más soluble que el tolueno.

Usos.

- Es un compuesto orgánico utilizado como aditivo oxigenante de las gasolinas con el objeto de aumentar su octanaje al reducir notablemente la generación de monóxido de carbono y de ozono, así como la presencia de partículas de plomo, proveniente de las emisiones vehiculares.

Toxicidad. Al contacto con los ojos y con la piel produce irritación, la inhalación prolongada puede causar tos, insuficiencia respiratoria, vértigo e intoxicación. El MTBE no se incluye dentro de los compuestos cancerígenos a humanos, pero si se incluye en la lista de **probables cancerígenos**, debido a que en estudios de laboratorio ha demostrado que es cancerígeno en ratas.



2.4 HIDROCARBUROS POLIAROMÁTICOS

Acenafteno ($C_{10}H_6(CH_2)_2$) Origen. Combustible soluble en etanol, cloroformo. Insoluble en agua. Muy soluble en benceno.

Usos.

- Se emplea en: producto intermedio en colorantes, productos romocenticos, insecticidas, fungicidas y plásticos.

Toxicidad. Evítese el contacto con los ojos y la piel. Daños al hígado. **No es cancerígeno en seres humanos.**

Antraceno ($C_{14}H_{10}$) Origen. Está presente en el alquitrán de hulla en una proporción del 0.5%. Cristaliza en láminas incoloras y presentan fluorescencia azul y funde a 217 °C. Tiene propiedades semiconductoras. Combustible. Ligeramente soluble en etanol, etil, eter, acetona. Insoluble en agua.

Usos.

- Se emplea en la producción de su principal derivado, la antraquinona, que es la base de un importante grupo de colorantes.
- Actualmente se investiga su posible utilización como semiconductor orgánico.

Toxicidad. La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión. Los síntomas por inhalación son: tos, dificultad respiratoria, dolor de garganta. Por ingestión: dolor abdominal. Crónicas exposiciones incrementan la incidencia de cáncer de piel, pulmón y de tracto gastrointestinal. Carcinógeno en animales. **No es cancerígeno en seres humanos.**

Benzo (a) Antraceno ($C_{18}H_{12}$) Origen. Insoluble en agua. Muy soluble en etanol.

Usos.

- Investigación científica.

Toxicidad. Muy tóxico. Evitar inhalación y contacto con la piel. **Es cancerígeno en seres humanos.**

Benzo (a) Pireno ($C_{20}H_{12}$) Origen. Está presente como un componente del contenido total de hidrocarburos aromáticos policíclicos en el medio ambiente. Insoluble en agua. Ligeramente soluble en alcohol. Soluble en benceno, tolueno y xileno. Muy soluble en cloroformo.

Usos.

- Utilizado en los laboratorios como test de mutagenicidad y cancerogenicidad.
- Síntesis química.

Toxicidad. Daños en ojos: irritación y fotosensibilidad. Irritación del aparato respiratorio con tos, y bronquitis, daños hepáticos, puede suprimir los componentes selectivos del sistema inmune. Crónicas exposiciones incrementan la incidencia de cáncer de piel, pulmón y de tracto gastrointestinal. La exposición humana se produce fundamentalmente a través del humo de tabaco, la inhalación de aire contaminado y por ingestión de comida y agua contaminadas por efluentes de combustión. Hay evidencia suficiente de que es cancerígeno en animales. **Es cancerígeno en seres humanos.**



Benzo (B) Fluoranteno (C₂₀H₁₂) Origen. Insoluble en agua, soluble en benceno, ácido acético, etanol.

Usos.

- Investigación científica.

Toxicidad. Irrita piel y ojos. Produce tumores en pulmón ensayado en ratones. **Es cancerígeno en seres humanos.**

Benzo (K) Fluoranteno (C₂₀H₁₂) Origen. Se presenta en forma de cristales amarillos, insoluble en agua, soluble en benceno, ácido acético, etanol. No inflamable. Material combustible.

Usos.

- Investigación científica.

Toxicidad. Sus efectos a corto plazo es la posible incidencia en el aumento de probabilidad de contraer cáncer de piel, vejiga, pulmón. Los síntomas pueden ser irritación del tracto respiratorio con tos, bronquitis, daños hepáticos, hematuria. Tóxico por ingestión, por inhalación del aerosol y por absorción a través de la piel. **Sustancia posiblemente carcinógena para los seres humanos.**

Benzo (g,h,i) Perileno (C₂₂H₁₂) Origen. Insoluble en agua, soluble en benceno, ácido acético, etanol.

Usos.

- Investigación científica.

Toxicidad. Efectos a corto plazo: irritación del aparato respiratorio con tos y bronquitis, daños hepáticos, hematuria, puede suprimir los componentes selectivos del sistema inmune. Efectos a largo plazo: crónicas exposiciones incrementan la incidencia d cáncer de piel, pulmón y de tracto gastrointestinal. **No clasificado como cancerígeno en humanos.**

Criseno (C₁₈H₁₂) Origen. Cristales. Sublima fácilmente en el vacío. Ligeramente soluble en etanol, etil éter, acetona, ácido acético glacial. Insoluble en agua.

Usos.

- Síntesis orgánica.

Toxicidad. Efectos a corto plazo: irritación del aparato respiratorio con tos y bronquitis, daños hepáticos, hematuria, puede suprimir los componentes selectivos del sistema inmune. Efectos a largo plazo: crónicas exposiciones incrementan la incidencia d cáncer de piel, pulmón y de tracto gastrointestinal. **Sospechoso de ser cancerígeno en humanos. Cancerígeno en animales.**

Fenantreno (C₁₄H₁₀) Origen. Combustible. Soluble en etanol, etil éter, benceno, ácido acético, disulfuro de carbono, acetona. Insoluble en agua. Se encuentra en el alquitrán de hulla en una proporción del 1-2 %. Cristaliza en forma de pajitas blancas y funde a 101 °C.

Usos.

- Síntesis de drogas.
- Investigación bioquímica.
- Fabricación de fenantrenoquinona.
- Forma parte de compuestos de gran importancia fisiológica tales como la colesterrina, esteroides (vitamina D), hormonas sexuales.



- Se emplea en la fabricación de colorantes, explosivos y medicamentos.

Toxicidad. Efectos a corto plazo: irritación del aparato respiratorio con tos y bronquitis, daños hepáticos, hematuria, puede suprimir los componentes selectivos del sistema inmune. Efectos a largo plazo: crónicas exposiciones incrementan la incidencia d cáncer de piel, pulmón y de tracto gastrointestinal. Induce a mutaciones en experimentos con animales. **No confirmado como cancerígeno en humanos.**

Fluoranteno (C₁₆H₁₀) Origen. Combustible. Soluble en etil éter, etanol, benceno. Insoluble en agua.

Usos.

- Utilizado en la producción de tintes fluorescentes y plásticos.
- En aceites dieléctricos aislantes.
- En la empresa farmacéutica.

Toxicidad. Efectos a corto plazo: irritación del aparato respiratorio con tos y bronquitis, daños hepáticos, hematuria, puede suprimir los componentes selectivos del sistema inmune. Efectos a largo plazo: crónicas exposiciones incrementan la incidencia d cáncer de piel, pulmón y de tracto gastrointestinal. Tóxico por ingestión, inhalación y contacto con la piel. **No confirmado como cancerígeno en humanos.**

Indeno (1,2,3, cd) Pireno (C₂₂H₁₂) Origen. Insoluble en agua. Soluble en benceno, etil éter, etanol.

Usos.

- Investigación científica.

Toxicidad. Es cancerígeno en seres humanos.

Naftaleno (C₁₀H₈). Origen. Conocido comúnmente como naftalina, está constituido por dos anillos bencénicos condensados que comparten 2 átomos de carbono. Se obtiene por destilación del alquitrán de hulla, que lo contiene en una proporción del 5-10 %. El producto así obtenido se purifica por sublimación. Cristaliza en láminas blancas y brillantes, es muy volátil y de olor fuerte característico. Su punto de fusión es 80.3 °C y el de ebullición 217 °C, aunque emite vapores ya desde los 100 °C. Es prácticamente insoluble en agua, pero se disuelve en éter, alcohol, benceno, quinoleína, tolueno y xileno.

Usos.

- Se emplea para fabricar colorantes y como insecticida y germicida.
- En la obtención de anhídrido y ácido ftálicos, usados en la fabricación de poliéster.
- Aditivos para el hormigón.
- En sustancias humectantes en la industria textil.

Toxicidad. El naftaleno ingresa al organismo por vía oral, dérmica o por inhalación y el efecto es generalmente poco tóxico. Muy pocas veces se presenta irritación de las mucosas y/o de la piel. La asimilación de una gran dosis produce anemia hemolítica, formación de cataratas y sensibilización. Los mayores riesgos recaen sobre los lactantes y fetos. **No existe información sobre el potencial carcinógeno o mutágeno.**



Pireno (C₁₆H₁₀) Origen. Hidrocarburo de anillo condensado. Sólido incoloro (las impurezas de tetraceno dan un color amarillo). Las soluciones tienen una ligera fluorescencia azul. Insoluble en agua. Soluble en benceno, etil éter, etanol.

Usos.

- Investigación bioquímica.

Toxicidad. Agente cancerígeno, adsorbido por la piel.



CAPÍTULO III. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS METALES PESADOS E HIDROCARBUROS AROMÁTICOS Y POLIAROMÁTICOS. COMPARACIÓN DE LÍMITES DE LIMPIEZA POR NORMATIVIDAD.

3.1 Propiedades Físico-Químicas de:

a) Metales Pesados.

METALES PESADOS : PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS

Parámetro	Símbolo	Núm. de Valencia	Peso Atómico	Núm. Atómico	Punto de Fusión (°C)	Punto de Ebullición (°C)
Aluminio	Al	+3	26,9815	13	660	2270
Arsénico	As	± 3,5	74,9215	33	-	-
Bario	Ba	+2	137,3277	56	850	1537
Cadmio	Cd	+2	112,4118	48	-	-
Cianuros	CN'	-	-	-	-	-
Cobre	Cu	+1,+2	63,5463	29	1080	2350
Cromo Total	Cr	+2,+3,+4,+6	51,9961	24	1903	2480
Fierro	Fe	+2, +3	55,8473	26	1535	2740
Manganeso	Mn	+2,+3,+4,+6,+7	54,9380	25	1260	2150
Mercurio	Hg	+1,+2	200,593	80	-38,89	356,95
Plomo	Pb	+2,+4	207,21	82	327,5	1750
Zinc	Zn	+2	65,392	30	420	907



b) Hidrocarburos Aromáticos.

HIDROCARBUROS AROMÁTICOS : PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS

Propiedad	Benceno	Etilbenceno	Tolueno	Xileno	MTBE
Fórmula Química	C ₆ H ₆	C ₆ H ₅ .C ₂ H ₅	C ₆ H ₅ .CH ₃	C ₆ H ₅ .(CH ₃) ₂	CH ₃ OC(CH ₃) ₃
Forma y Color	Líquido incoloro	Líquido incoloro	Líquido incoloro	Líquido incoloro	Líquido incoloro
Densidad relativa (g/cm ³)	0.879	0.867	0.866	0.881	0.743
Peso molecular	78.11	106.16	92.3	106.16	88.15
Punto de fusión °C	5.5	-94.4	-95	-25	
Punto de ebullición °C	80.1	136.2	110.8	144.8	55.2
Presión de vapor a 20-25 °C (mm Hg)	95.2	10.0	30.0	7.0	249.0
Coefficiente de distribución octanol/agua (log K _{ow})	1.77	2.56	2.13	2.38	1.08
Constante de la Ley de Henry (K _{aw}) adimensional	0.2290	0.325	0.260	0.290	0.0238
Coefficiente de difusión en aire (cm ² /s)	0.088	0.0750	0.0850	0.0720	0.079
Coefficiente de difusión en agua (cm ² /s)	0.0000098	0.00000780	0.00000940	0.00000850	0.0000940
Factor de retardo (condiciones : 20-25 °C, f _{oc} =0.4, porosidad 0.25, densidad real 1.75 (Kg/l))	3.38		3.99		1.38
Afinidad por carbono orgánico (log K _{oc} ; Kg ⁻¹)	1.5 - 2.2		1.6 - 2.3		1.0 - 1.1
Límite de inflamabilidad o explosividad (%)	1.3 - 7.8		1.1 - 7.1		1.6 - 8.4
Solubilidad en agua a 20-25 °C (mg/l)	1,750	169	515	198	48,000 - 51,000



c) Hidrocarburos Poli aromáticos.

HIDROCARBUROS POLIAROMÁTICOS : PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS

Poli aromáticos	Peso Molecular (g/mol)	Coef. de difusión en aire (cm ² /s)	Coef. de difusión en agua (cm ² /s)	Coef. de distribución octanol/agua (log K _{ow})	Constante de Ley de Henry (K _{aw})	Presión de vapor a 20-25 °C (mm Hg)	Solubilidad a 20-25 °C (mg/l)
Acenafteno	154.2	0.0421	0.00000769	3.85	0.318	0.005	3.93
Antraceno	178.2	0.0324	0.00000774	4.15	2.78	0.0000013	0.0450
Benzo(a)Antraceno	228.3	0.0510	0.00000900	6.14	0.00000569	0.00000015	0.0057
Benzo(a)Pireno	252.3	0.0430	0.00000900	6.01	0.0000466	0.000568	0.0016
Benzo(B)Fluoranteno	252.0	0.0226	0.00000556	5.74	0.000829	0.000000667	0.0147
Benzo(K)Fluoranteno	252.3	0.0226	0.00000556	5.74	0.000000441	0.00000000959	0.0043
Benzo(g,h,i)Perileno	276.0	0.0490	0.00005650	6.20	0.00000577	0.000000001	0.0007
Criseno	228.2	0.0248	0.00000621	5.30	0.000000487	0.00000000576	0.0018
Fenantreno	178.2	0.0333	0.00000747	4.15	0.250	0.00021	1.60
Fluoranteno	202.0	0.0302	0.00000635	4.58	2.76	0.0177	0.206
Indeno(1,2,3,cd)Pireno	276.3	0.0233	0.00000441	7.53	0.00000000021	0.000000001	0.0620
Naftaleno	128.2	0.0590	0.00000750	3.30	0.0199	0.230	31
Pireno	202.3	0.0272	0.00000724	4.58	0.00000029	0.000000042	0.160



3.2 Límites Máximos Permisibles de:

a) Metales Pesados

METALES PESADOS

Metales Pesados	Unidad	LFD (2003)	OMS (1995)
Aluminio	mg/l	0.02	-
Arsénico	mg/l	0.05	0.01
Bario	mg/l	1.0	0.7
Cadmio	mg/l	0.01	0.003
Cianuros	mg/l	0.02	0.07
Cobre	mg/l	1.0	2.0
Cromo Total	mg/l	0.05	0.05
Fierro	mg/l	0.3	2.0
Manganeso	mg/l	0.05	0.5
Mercurio	mg/l	0.001	0.001
Plomo	mg/l	0.05	0.01
Zinc	mg/l	5.0	3.0

LFD = Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2003
OMS = Organización Mundial de la Salud 1995



b) Hidrocarburos Aromáticos.

HIDROCARBUROS AROMÁTICOS

Hidrocarburos Aromáticos	U	LFD	OMS 1995	Lab. ABC/LDD	USEPA	CANADA*	WSWC
Benceno	mg/l	0.01	0.010	0.005	0.005	0.005	-
Etilbenceno	mg/l	0.3	0.3	0.1	0.7	0.024	-
Tolueno	mg/l	0.7	0.7	0.2	1.0	0.0024	-
Xileno	mg/l	-	0.5	0.1	10.0	0.3	-
MTBE	mg/l	-	-	-	-	-	0.013

U = Unidad de medida

LFD = Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2003

OMS = Organización Mundial de la Salud

Lab. ABC = Laboratorios ABC

LDD = Límites de detección

USEPA = Agencia de Protección al Ambiente de los E.U.

*British Columbia 1995

WSWC = Western States of Water Council California (2000)



c) Hidrocarburos Poliaromáticos.

HIDROCARBUROS POLIAROMÁTICOS

Hidrocarburos Poliaromáticos	U	Límite Inferior	Límite Superior	LFD (2003)	OMS 1995	Lab. ABC	USEPA	CANADA*
Acenafteno	mg/l	-	-	0.02	0.02	1.2	-	0.00001
Antraceno	mg/l	0.002	0.02	-	-	-	-	-
Benzo(a)Antraceno	mg/l	0.0005	0.001	-	-	0.0044	-	0.0001
Benzo(a)Pireno	mg/l	0.00003	0.001	-	0.0007 (0.0001)	0.0044	0.0002	0.0001
Benzo(B)Fluoranteno	mg/l	0.0002	0.002	-	(0.0001)	0.0044	-	0.0001
Benzo(K)Fluoranteno	mg/l	0.0002	0.002	-	(0.0001)	0.0044	-	0.0001
Benzo(g,h,i)Perileno	mg/l	0.001	0.005	-	(0.0001)	-	-	-
Criseno	mg/l	0.0003	0.005	-	-	0.0044	-	-
Fenantreno	mg/l	0.001	0.01	-	-	-	-	-
Fluoranteno	mg/l	0.001	0.01	0.04	0.04 (0.0001)	0.3	-	-
Indeno(1,2,3,cd)Pireno	mg/l	0.0005	0.002	-	(0.0001)	-	-	-
Naftaleno	mg/l	0.007	0.03	-	-	2.5	0.02	-
Pireno	mg/l	-	-	-	-	-	-	-

LFD = Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2003

() OMS = Organización Mundial de la Salud 1984

Lab. ABC = Laboratorios ABC

*British Columbia 1995

USEPA = Agencia de Protección al Ambiente de los E.U.



CAPÍTULO IV. SISTEMAS DE REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS.

4.1 REMEDIACIÓN PARA EL AGUA SUBTERRÁNEA CONTAMINADA.

En este capítulo, se describen las técnicas de remedición para el agua subterránea contaminada. El propósito de este capítulo es presentar un planteamiento comprensible del desarrollo e implementación de la remedición del agua subterránea; se presentan ejemplos de tales propósitos y referencias de información. En otra parte, los propósitos y las metas, de los programas de remedición de aguas subterráneas también se describe el papel del cálculo del riesgo en los programas de remedición. Se describen los alcances de la remedición con base en los requerimientos actuales de la Agencia de Protección al Ambiente de los E.U. (*USEPA*) para aquellos sitios que están regulados bajo el Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (*RCRA*).

El agua subterránea es una fuente importante de agua. En los E.U. cerca del 50% de toda el agua potable se obtiene de las aguas subterráneas. Por otro lado, la mayoría de la población Norteamericana vive cerca de las poblaciones industrializadas, las cuales están localizadas cerca de los suministros de agua subterránea. Diversos casos de contaminación de agua subterránea han ilustrado los impactos negativos que pueden provocar a la salud humana, por lo que es decisivo proteger la integridad de los suministros de agua subterránea para la protección de la salud humana y el medio ambiente.

La necesidad de remediar el agua subterránea se establece con base en la evaluación de análisis o programas de monitoreo. Si los resultados del monitoreo indican que las concentraciones de contaminantes son una amenaza para la salud humana o al ambiente, entonces el agua subterránea debe ser remediada. La remedición en este sentido, se refiere a la reducción del riesgo causado por la exposición a los contaminantes presentes en el agua subterránea. Uno de los más importantes pasos del programa de remedición es definir las metas del programa, que pueden ser:

- La restauración completa, que implica la remoción de todos los contaminante del acuífero contaminado.
- No degradación, que implica la remoción de aquellos contaminantes que exceden los límites del equipo analítico disponible o las concentraciones de fondo.
- Remedición basada en Normas de salud, que implica la remoción de contaminantes que están presentes en concentraciones que podrían causar efectos adversos a la salud.
- Remedición basada en los límites de la tecnología, que implica el uso de la mejor tecnología disponible para eliminar la mayor cantidad posible de contaminantes.
- Restricciones de uso: restricciones legales de uso del agua subterránea en áreas donde el agua subterránea ha sido contaminada, o barreras físicas para prevenir el acceso al acuífero contaminado.
- Contención, que implica el uso de sistemas ingenieriles para prevenir la migración de los contaminantes hacia localidades donde algunos receptores pudieran exponerse a los contaminantes.

En la **Tabla 4.1** se presenta un resumen de las ventajas y desventajas de las metas de remedición. Cuando se selecciona una meta de remedición, se debe examinar el grado al cual el agua subterránea puede remediarse. Basándose en estudios recientes de la *USEPA*, el promedio actual de remediaciones exitosas mediante bombeo y tratamiento es extremadamente bajo. En la **Tabla 4.2** un resumen de resultados por la *USEPA*, es presentado por el Consejo Nacional de Investigación (*NRC*)(1994). Aunque existen diversas razones para explicar las fallas de los sistemas para alcanzar sus metas, los datos sugieren que para la mayoría de las circunstancias, las mejores tecnologías disponibles no son capaces de restaurar el agua subterránea hasta su calidad original. Sin embargo, regresar al agua subterránea a su uso potencial o eliminar riesgos a la salud o al ambiente no siempre requiere la restauración hasta su calidad original.



Se ha desarrollado un creciente número de sistemas de remediación con el objeto de remover contaminantes o remediar hasta niveles de normas basadas en salud. Una forma para alcanzar estas metas de remediación es estimar el riesgo asociado a la exposición del agua subterránea contaminada y entonces diseñar un sistema de remediación que mejore la calidad del agua a un nivel de protección a la salud humana y al ambiente. Después de seleccionar una meta de remediación se debe implementar tecnología para alcanzarla. El agua subterránea puede ser remediada en una de las 3 siguientes maneras:

CONTENCIÓN. La contención de la pluma de contaminantes implica impedir que dicha pluma migre hacia un sitio donde existan receptores que pudieran ser expuestos a ésta.

EXTRACCIÓN. Para algunos planteamientos de remediación, el agua subterránea debe ser extraída del subsuelo, para permitir el tratamiento ex situ o para proporcionar control hidráulico del agua contaminada.

TRATAMIENTO. El agua subterránea contaminada puede ser tratada, in situ o ex situ, usando una diversidad de métodos físicos, químicos o biológicos.

TABLA 4.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS METAS DE LIMPIEZA

METAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Restauración completa no degradación.	Eliminación de todo riesgo. Reducción de contaminantes hasta los más bajos niveles medibles.	Probablemente imposible. Extremadamente difícil, cara y toma tiempo para muchos contaminantes y características hidrogeológicas.
Normas basadas en la salud.	Diseñadas para prevenir impactos medibles a la salud humana y al ambiente.	Las normas basadas en la salud son difíciles de definir y pueden ser imprecisas para los impactos a la salud por la exposición al agua contaminada.
Normas basadas en tecnología.	Permite que el tratamiento sea óptimo con la tecnología disponible.	Podría no reducir el riesgo hasta los niveles de protección a la salud humana y al ambiente.
Restricciones de uso parcial.	Previenen el contacto entre los contaminantes y los receptores con un costo-beneficio bajo.	Dejan contaminantes que pueden causar riesgos si las restricciones de uso parcial son ineficientes.
Contención.	Relativamente predecibles y confiables; menos costoso que otros tipos de remediación.	Dejan contaminantes que podrían migrar si los sistemas de contención fallan.



TABLA 4.2 RESUMEN DE DATOS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO Y TRATAMIENTO

Categoría ¹	No. de sitios	No. de sitios que lograron la contención	No. de sitios que lograron la meta de limpieza	No. de sitios donde no se lograron las metas
1	2	1	1	1
2	13	8	4	9
3	19	12	4	15
4	36	18	0	36

NOTA: ¹ Indica la facilidad relativa de limpieza, siendo 1 la más fácil y 4 la más difícil.

4.2 RIESGOS ASOCIADOS CON AGUA SUBTERRÁNEA CONTAMINADA.

El agua subterránea contaminada puede representar un riesgo a la salud humana o al ambiente si se pone en contacto con receptores y si el agua contaminada contiene concentraciones que pudieran afectar la salud de los receptores. El riesgo se define como la probabilidad de ocurrencia de impactos a la salud humana o al ambiente debidos a la liberación de contaminantes al ambiente. Los riesgos pueden evaluarse elaborando una tabla de riesgos, como lo describe la USEPA (1989a) Figura 4.1. El objeto de elaborar una tabla de riesgos es estimar los riesgos presentes y futuros asociados con el agua subterránea contaminada y comparar el riesgo estimado con el umbral aceptable de riesgo; si el umbral aceptable de riesgo es excedido, se debe remediar el agua subterránea. Las técnicas de evaluación de riesgo pueden ser usadas para estimar el riesgo después de llevar a cabo un programa de remediación. La estimación de los riesgos a futuro para diversas remediaciones puede sentar las bases para seleccionar una tecnología que reduzca los riesgos eficientemente. Con base en los resultados de una evaluación de riesgo pueden proponerse límites de concentración no cero para los contaminantes en el agua subterránea para tener un riesgo aceptable. Para algunos contaminantes, la USEPA a definido las concentraciones de exposición como aquellas que resulten en un riesgo de 10^{-6} ; estas concentraciones se definen como "Niveles Máximos de Contaminantes" (MCLs). La USEPA también permite a los responsables de la contaminación proponer con base en un análisis caso por caso, niveles alternativos de contaminantes (ACLs), que resulten en un nivel de exposición específico para el sitio (después de considerar el destino y el transporte de los contaminantes) de 10^{-6} .

Existen numerosas fuentes de incertidumbre en los métodos de evaluación de riesgo disponibles (NRC, 1994). Existen muy pocos datos para establecer una relación concluyente entre la exposición humana a contaminantes específicos y sus impactos a la salud o al ambiente. La exactitud de estudios epidemiológicos llevados a cabo en humanos es limitado, con significado incierto debido a:

- (1) cantidad y duración de exposición;
- (2) latencia de impactos observables;
- (3) las relativamente pequeñas poblaciones de estudio;
- (4) inadecuado control sobre grupos de comparación;
- (5) incapacidad para atribuir los problemas de salud observados únicamente a la exposición conocida; y
- (6) los efectos sinérgicos en los humanos de la exposición a ciertos contaminantes.

La exactitud de los estudios epidemiológicos en animales es restringida debido a:

- (1) la necesidad de extrapolar los resultados de los impactos de altas dosis en animales para estimar los impactos de pequeñas dosis en humanos; y
- (2) la tendencia de dichos estudios al centrarse a la exposición a un solo contaminante.

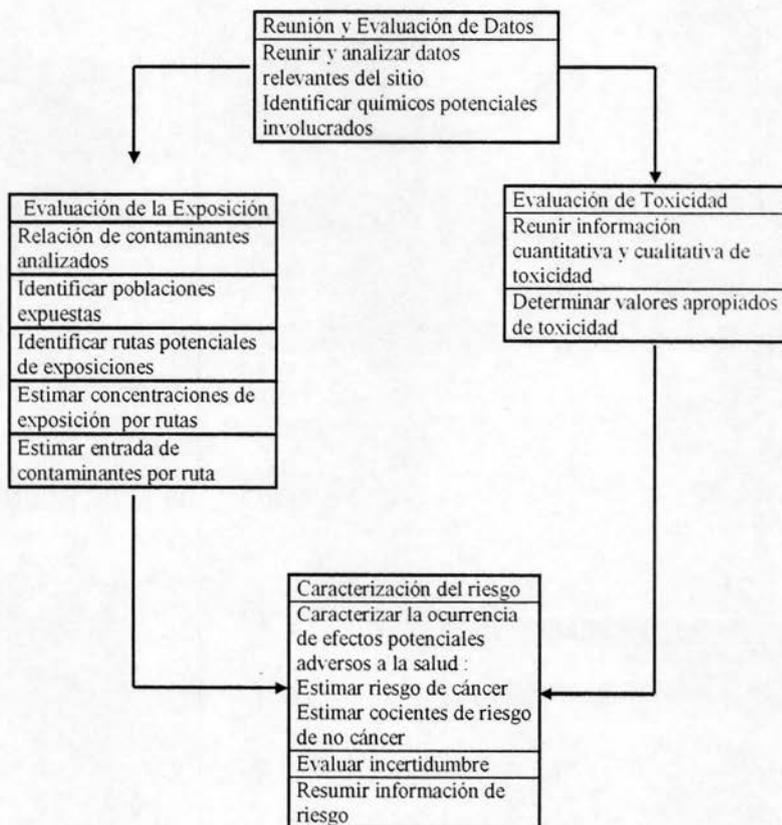
Como las concentraciones de los contaminantes en aguas subterráneas pueden cambiar debido a factores como la atenuación y el tratamiento durante el periodo de exposición, la cantidad de contaminantes a la cual un receptor se expone puede cambiar durante el periodo considerado. Debido a estas razones, los



resultados de la evaluación de riesgo tienen un grado de incertidumbre. Para explicar este grado de incertidumbre, muchas suposiciones son asumidas cuando se estima toxicidad y exposición cuantitativa para reducir las posibilidades de subestimar el riesgo actual. Por lo tanto, el riesgo estimado puede ser extremadamente conservador.

Después de que el riesgo de exposición al agua subterránea contaminada está definido, se puede decidir si el riesgo es bastante alto o no para garantizar la remediación. Este proceso de decisión, se refiere al manejo de riesgo desarrollado con base en información de agencias regulatorias y de la población expuesta al riesgo. La USEPA considera un rango de riesgo de 10^{-4} a 10^{-6} para sitios aceptados por el Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (RCRA). El nivel aceptable de riesgo puede variar de localidad a localidad y es un balance entre los beneficios al público y un ambiente limpio y el costo público asociado a la limpieza del medio. El beneficio de un ambiente limpio es difícil de determinar, pero puede estimarse en términos del dinero que la población podría gastar en limpiar el medio; sin embargo, este planteamiento es abstracto y contiene defectos (NRC 1994). Debido a las dificultades para obtener una estimación precisa del valor de un ambiente limpio, el valor comúnmente usado para un riesgo aceptable ha sido definido arbitrariamente.

Figura 4.1 Evaluación de Riesgo.





4.3 PLANTEAMIENTOS PARA LA REMEDIACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA.

El diseño para un sistema de remediación eficiente para aguas subterráneas requiere del entendimiento de la naturaleza de la contaminación, los objetivos de la remediación, y sus capacidades para conseguir los objetivos. Cuando se planea un sistema de remediación, el uso de una ruta crítica pueden simplificar el diseño de los procesos y minimizar el fracaso en el sistema para lograr las metas de remediación. Los seis pasos para el diseño de los sistemas de remediación son:

PASO 1. DEFINIR EL PROBLEMA.

El primer paso para el diseño del sistema de remediación para el agua subterránea es definir el problema con suficiente detalle para permitir el diseño de un sistema eficiente y costeable. El problema debe definirse en términos de la extensión de la contaminación, el riesgo asociado con el agua subterránea contaminada, los reglamentos que aplican, el grado requerido de remediación y las condiciones de la superficie. Si la extensión vertical y horizontal de la contaminación no fue evaluada adecuadamente durante la exploración en sitio o con el programa de monitoreo, pueden colectarse datos en una visita de campo para completar la evaluación. La regulación puede ser identificada con base en la información presentada en el capítulo 3. Las condiciones de la superficie se describen en el capítulo 1. Las diversas maneras en las cuales el agua subterránea puede contaminarse se ilustran en la **Figura 4.2**. Las consideraciones hidrogeológicas para la remediación del agua subterránea se resumen en la **Tablas 4.3 y 4.4**. La hidrogeología tiene un peso determinante en el tipo de sistema de remediación para un sitio **Tabla 4.5**.

Figura 4.2 Contaminación del Agua Subterránea por diferentes compuestos.

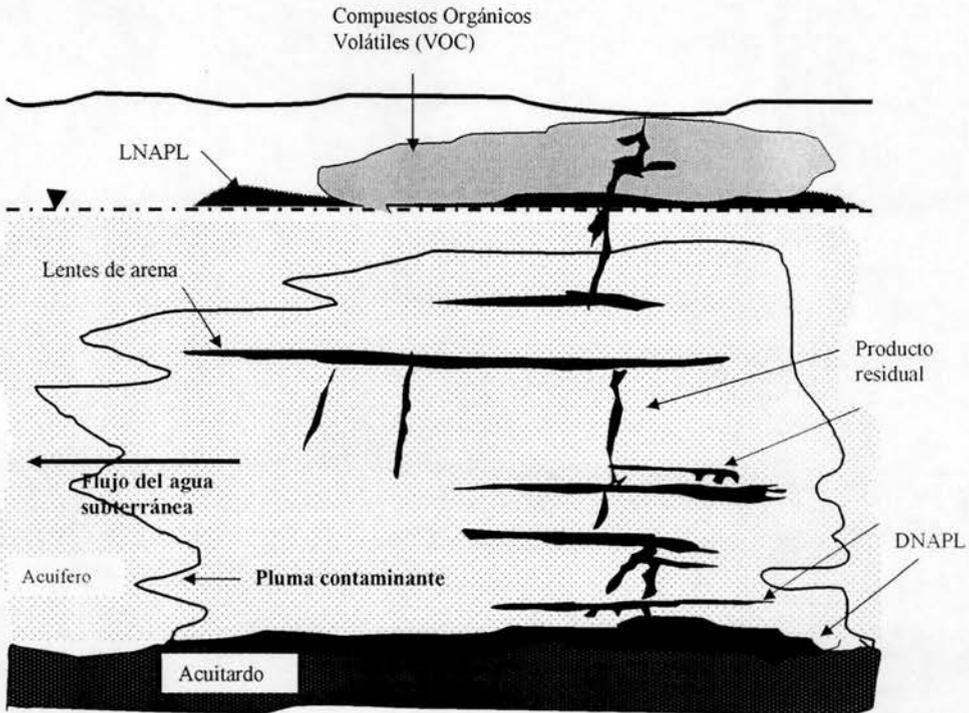




TABLA 4.3 PROPIEDADES HIDRÁULICAS IMPORTANTES DEL ACUÍFERO PARA LA LIMPIEZA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

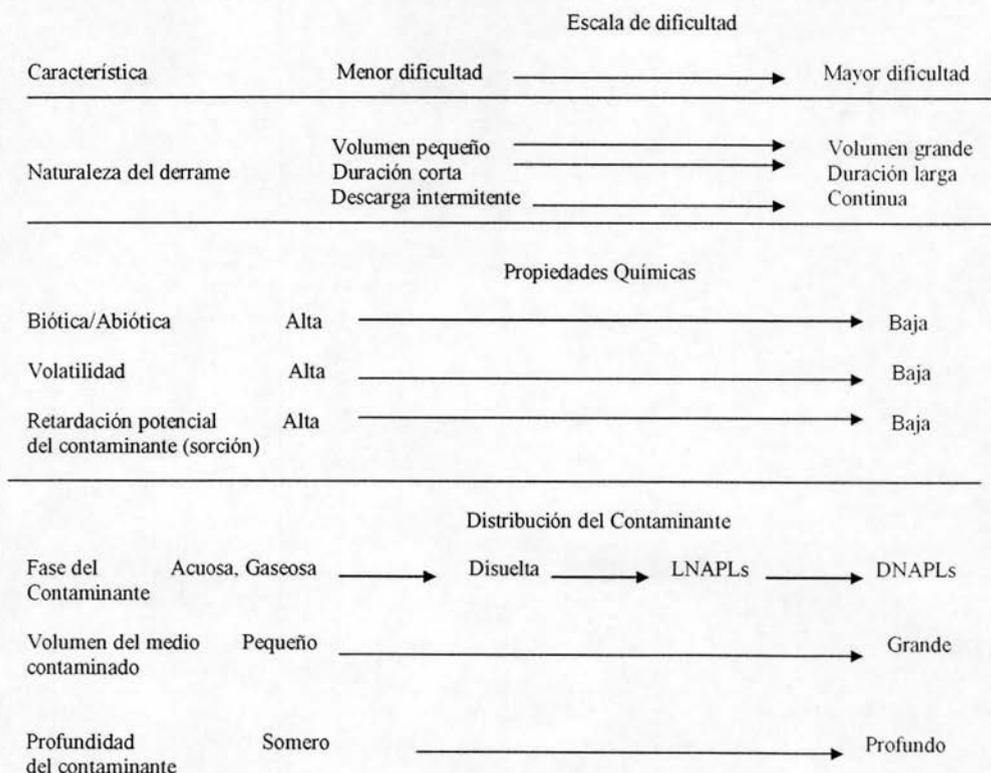
PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN	IMPORTANCIA DE LA LIMPIEZA DEL AGUA SUBTERRÁNEA
Porosidad	Volumen de poros existentes en un volumen de masa	Poros que almacenan agua y contaminantes
Porosidad efectiva	Espacio de poros interconectados que pueden transportar fluidos	Agua y contaminantes que fluyen alrededor de los poros
Permeabilidad	Velocidad promedio del fluido	Influye en la dirección y velocidad del contaminante
Gradiente hidráulico	Diferencia de elevación y presión que causan filtración de fluidos	Influye en la dirección del movimiento del contaminante
Conductividad hidráulica	Facilidad con la cual el agua puede moverse alrededor de las formaciones geológicas	Influye en la velocidad por la cual el fluido puede ser bombeado para su tratamiento, así como la velocidad y dirección de la migración del agua subterránea
Transmisividad	Producto de la formación de estratos y conductividad hidráulica	Influye en la velocidad de migración de la pluma contaminante y de la velocidad del fluido para ser bombeado y tratado
Coefficiente de almacenamiento	Volumen liberado por cambios de presión por unidad de área durante el bombeo en un acuífero confinado	Influye en la cantidad de fluido que puede obtenerse por bombeo
Rendimiento específico	Fración del volumen total del poro liberado como agua por gravedad durante el bombeo en un acuífero confinado	Influye en la cantidad del fluido que puede obtenerse por bombeo
Retención específica	Fración del volumen total de agua retenida en un acuífero arriba de la superficie después de bombearla en una formación sin confinamiento	Influye en la cantidad de contaminante que permanece en el subsuelo después del bombeo

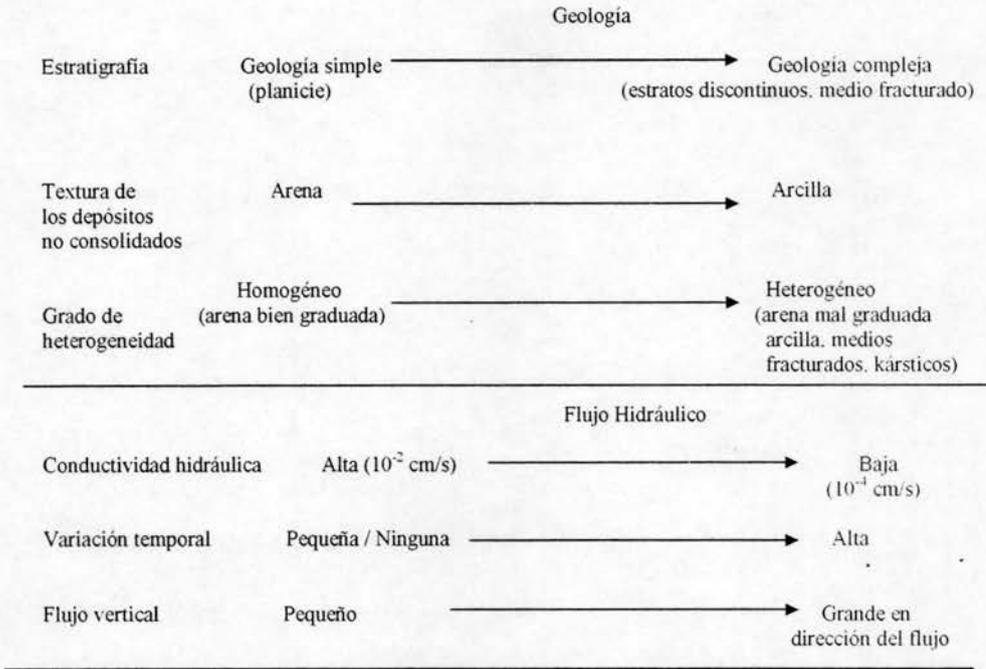


TABLA 4.4 RESUMEN DE LOS MECANISMOS QUE INFLUYEN EN EL DESTINO DE LOS CONTAMINANTES EN EL MEDIO AMBIENTE

PROCESOS	CONDICIONES DEL MEDIO AMBIENTE	CONTAMINANTE
Movimiento	Velocidad del flujo de agua Permeabilidad Movimiento del agua Tensión superficial	Cantidad del material Estado físico Solubilidad Viscosidad
Retención (afectación del transporte por procesos físicos)	Suelo/Sedimento Contenido de materia orgánica Capacidad de sorción	Tipo de solubilidad Característica iónica
Reacción (afectación del transporte por procesos químicos)	pH Potencial redox Comunidad microbiana	Transformación química Biodegradabilidad

TABLA 4.5 EJEMPLOS DE FACTORES QUE AFECTAN LA REMEDIACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA





FASE LÍQUIDA "LIGERA" NO ACUOSA (LNAPL) Y FASE LÍQUIDA "DENSA" NO ACUOSA (DNAPL)

PASO 2. DEFINIR LA META DE REMEDIACIÓN PARA EL AGUA SUBTERRÁNEA.

El siguiente paso para diseñar un sistema de remediación es definir la meta de la remediación. Este paso requiere:

- (1) Identificar las tecnologías de remediación que podrían ser usadas para remediar el agua subterránea contaminada;
- (2) Revisar la lista para identificar las tecnologías de remediación que puedan implementarse exitosamente en el sitio, y
- (3) Seleccionar una meta apropiada de remediación con base en las tecnologías que puedan ser implementadas con éxito.

El resumen de las tecnologías de remediación que pueden ser utilizadas se presenta en la **Tabla 4.6**. Las metas probables de remediación se describen en la **sección 4.1** y en la **Tabla 4.7** se presentan las propuestas que corresponden con estas metas. Para aquellos sitios en donde se demostró que la remediación es necesaria, las metas de remediación pueden ser desarrolladas con una completa comprensión de las metas alcanzables. Estas comienzan con la comprensión de la dificultad de remediación o restauración de la calidad del agua subterránea en relación con las constantes hidrogeológicas **Tabla 4.5**. La posibilidad de lograr las metas de remediación puede evaluarse basándose en experiencias con similares problemas en condiciones hidrogeológicas similares. La posibilidad de éxito en la remediación del agua subterránea basada en documentos de la experiencia en alcanzar las metas de remediación basadas en la salud se ilustra en la **Tabla 4.8**, la cual fue desarrollada con base en un análisis de la información de la **Tabla 4.2**. Actualmente es posible remediar algunos sitios cumpliendo las Normas de Salud (como en el caso de acuíferos homogéneos contaminados con solventes, contaminantes móviles del "Grupo A" de la **Tabla 4.8**), pero no para otros sitios (acuíferos heterogéneos o de roca fracturada contaminados con contaminantes no acuosos fase líquida del "Grupo C" de la **Tabla 4.8**). Sin tener en cuenta las metas seleccionadas, debe notarse que, la concentración cero de un contaminante como resultado de la remediación del agua subterránea podría ser una meta



inalcanzable sin importar el avance de las tecnologías de remediación. La dificultad de remediar la calidad del agua subterránea contaminada en algunos sitios es solo dirigido por la *USEPA* en el documento, Guía para la Evaluación de la Imposibilidad Técnica para la Remedación del Agua Subterránea (1993b). En este documento, se identifican varias condiciones hidrogeológicas en las que probablemente la calidad del agua subterránea no podría restaurarse hasta las condiciones previas a la contaminación.

Una vez seleccionada la meta de remediación y teniendo identificados las tecnologías que podrían ser implementadas en el sitio, se debe analizar la lista de posibilidades de remediación aplicables al caso basándose en su experiencia de tal manera que se alcance la meta de remediación. Las tecnologías son evaluadas en el paso 3.

TABLA 4.6 RESUMEN DE LAS TECNOLOGÍAS COMÚNMENTE USADAS PARA LA REMEDIACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Tecnología alternativa	Concentración residual en el agua subterránea	Concentración residual disuelta en la fuente activa	Tiempo de limpieza ^a
		Fuente de Remedación	
Bombeo y Tratamiento Convencional	Bajo a Medio	Medio a Alto	Largo
Extracción y Bioventeo	NA	Bajo a Medio	Corto
Inyección de Aire (pozos horizontales y verticales)	Bajo a Medio	Bajo a Medio	Corto a Medio
Bioremediación de Hidrocarburos "in situ"	Bajo a Medio	Bajo a Alto	Corto a Medio
Bioremediación de Solventes Clorados "in situ"	Bajo a Medio	Bajo a Alto	Medio a Largo
Flujo de Solventes y Surfactantes	Bajo a Medio	Bajo a Medio	Corto a Medio
Inyección de Vapor	Bajo a Medio	Bajo a Medio	Corto
Desorción Térmica "in situ"	Bajo a Medio	Bajo a Medio	Corto
Oxidación Química "in situ"	Medio (?)	Medio a Alto (?)	Medio (?)
Bioremediación de Metales "in situ"	Bajo a Medio	Bajo a Alto	Medio a Alto
Bioremediación Intrínseca	Bajo a Medio	Bajo a Alto	Largo
Remediación de la Pluma			
Bombeo y Tratamiento Convencional	Bajo	Medio a Alto	Largo
Inyección de Aire (pozos horizontales y verticales)	Bajo a Medio	Bajo a Medio	Medio a Largo



Bioremediación de Hidrocarburos "in situ"	Bajo a Medio	Bajo a Alto	Medio a Largo
Bioremediación de Solventes Clorados "in situ"	Bajo a Medio	Bajo a Alto	Medio a Largo
Barreras Reactivas "in situ"	Bajo	NA	Largo
Bioremediación Intrínseca	Bajo a Medio	Bajo a Medio	Largo

NOTA: Una "baja" concentración residual y "medio" tiempo de limpieza refleja una buena ejecución, mientras una "alta" concentración residual y "largo" tiempo de limpieza refleja mucho menos ejecución efectiva. "NA" indica que la tecnología no es aplicable en esta situación.

a. Dado que pocos casos de ejecución de metas de limpieza han sido reportados, es una evaluación cuantitativa.

TABLA 4.7 METAS PARA LA REMEDIACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y CORRESPONDIENTES PLANTEAMIENTOS DE REMEDIACIÓN

METAS DE REMEDIACIÓN	EJEMPLOS DE PLANTEAMIENTOS DE REMEDIACIÓN
Restauración del agua subterránea	Remediación natural Bioremediación Combinaciones de planteamientos convencionales de remediación
No degradación	Remoción de la fuente Bombeo y tratamiento convencional Bioremediación SVE/AS
Restitución de acuíferos con base en Normas de Salud	Eliminación original Clásico bombeo y tratamiento Bioremediación SVE/AS
Tecnología aplicada con base en Normas	Fitoremediación Electrocinética Extracción por solventes Desorción térmica
Políticas de uso-implementar restricciones	Ejecución de restricciones Ordenamientos locales
Contención	Barreras físicas Barreras hidráulicas Encapsulamiento

Sistema de Extracción de Vapores del Suelo (SVE)
Inyección de Aire (AS)



TABLA 4.8 PROBABILIDADES DE ÉXITO PARA LA RESTAURACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

QUÍMICA DEL CONTAMINANTE

Hidrogeología	Móvil, disuelto (se degrada/se volatiliza)	Móvil, disuelto	Fuertemente disuelto (se degrada/se volatiliza)	Fuertemente disuelto	Separación de fase de los LNAPL	Separación de fase de los DNAPL
Homogeneidad en una sola capa	A (1)	A (1-2)	B (2)	B (2-3)	B (2-3)	B (3)
Homogeneidad en múltiples capas	A (1)	A (1-2)	B (2)	B (2-3)	B (2-3)	B (3)
Heterogeneidad en una sola capa	B (2)	B (2)	B (3)	B (3)	B (3)	C (4)
Heterogeneidad en múltiples capas	B (2)	B (2)	B (3)	B (3)	B (3)	C (4)
Fracturada	B (3)	B (3)	B (3)	B (3)	C (4)	C (4)

NOTA: La valoración numérica indica la relativa facilidad de limpieza, donde (1) es fácilmente y (4) es más difícil.

El "Grupo A" representa los tipos de sitios para los cuales la limpieza completa con base en Normas de Salud pudiera ser factible con la tecnología actual.

El "Grupo B" representa sitios para los cuales la factibilidad técnica de realizar la limpieza completa podría ser incierta.

El "Grupo C" representa los tipos de sitio para los cuales la limpieza completa en las áreas de origen con base en Normas de Salud podría ser técnicamente poco factible.

PASO 3. SELECCIÓN DE REMEDIOS ESCOGIDOS.

Después de que se ha preparado la lista de tecnologías elegidas para la remediación, éstas tecnologías deben analizarse para identificar cual puede alcanzar la meta de remediación de manera más eficiente y rentable. A continuación se describen tres pasos para lograr este análisis.

- **Preparación del diseño conceptual preliminar para cada tecnología elegida.** Mediante la preparación de un diseño conceptual, la eficiencia y el costo de la tecnología puede ser evaluado. Desarrollar e implementar criterios de diseño puede ser un camino efectivo para enfocar los esfuerzos del diseño en las cuestiones claves para lograr un proyecto exitoso. Los criterios de diseño son guías para usarse durante el diseño de la remediación y resultarán en una ejecución exitosa del sistema de remediación. Los criterios de diseño pueden desarrollarse atendiendo a aspectos de construcción, limitantes de la tecnología aplicada, asignaciones presupuestales, requisitos de operación y mantenimiento y requerimientos regulatorios. Las tecnologías elegidas pueden compararse examinando los resultados de estas evaluaciones y seleccionando la que puede alcanzar más eficientemente en costo las metas de remediación. Los diseños conceptuales deben contener los criterios de diseño que son relevantes en la etapa del diseño conceptual.
- **Evaluación de la efectividad de los diseños conceptuales.** La evaluación eficiente de los diseños que logran la meta de remediación puede realizarse objetivamente o subjetivamente (usando la información de la **Tabla 4.8**). También, el tiempo requerido para lograr la meta de remediación debe estimarse para usarse en la evaluación del costo.
- **Evaluación del costo de las tecnologías.** Deberá estimarse el costo de cada tecnología, en particular, el presente valor considerando el capital y la operación a largo plazo y los costos de mantenimiento, para proporcionar bases consistentes de comparación de los costos.



PASO 4. PREPARAR EL DISEÑO DE DETALLE.

Una vez que sea seleccionada la tecnología, debe prepararse un bosquejo del diseño de detalle aplicable para la construcción del sistema. Se recomienda que se efectúen cálculos detallados para demostrar que cada uno de los criterios de diseño se satisfagan. También, es recomendable que se demuestre la capacidad del diseño para mitigar los impactos adversos a la salud humana y al ambiente; esto se hace mediante una evaluación de riesgo para las condiciones que podrían existir durante y después de la operación del sistema de remediación. Una tecnología eficaz alcanzará la meta de remediación, mitigar el riesgo de exposición a aguas subterráneas contaminadas, y suministrar un servicio eficiente durante la vida útil del sistema. Los diseños de remediación son procesos iterativos, el diseño debe criticarse varias veces para identificar mejoras que pueden perfeccionar su desempeño o reducir el costo del sistema. Tal evaluación puede llevarse a cabo sujetando el diseño preliminar a una revisión detallada mediante:

- (1) un revisor crítico calificado en la tecnología que no haya sido parte integral del proceso de diseño (para proporcionar una evaluación crítica e imparcial del diseño);
- (2) un contratista (para suministrar una evaluación de la utilidad de construir el diseño);
- (3) un profesional en evaluación de riesgo (para dar una indicación de la capacidad del diseño y así alcanzar los objetivos de remediación a fin de mitigar los riesgos a la salud humana o al ambiente); o
- (4) un operador de un sistema similar (para una revisión del valor ingenieril o una evaluación de los costos potenciales o las dificultades para operar el sistema propuesto).

Aunque tales revisiones pudieran parecer ociosas resultan en un valor agregado que mejora la posibilidad de alcanzar los criterios de diseño. Debido a que tales revisiones reducen la posibilidad de fracaso del sistema de remediación, éstas pudieran ser componentes efectivos de un programa preventivo de pérdidas y responsabilidades.

PASO 5. IMPLEMENTAR EL DISEÑO.

Después de que el diseño ha sido terminado y revisado, debe implementarse construir y operar el sistema. El primer paso para construir el sistema es decidir cómo y quién construirá el sistema. Hay varios métodos de arreglo para construir un sistema de remediación que incluyen:

- (1) construcción por el propietario;
- (2) solicitar cotizaciones competitivas de contratistas independientes calificados para el trabajo;
- (3) negociar un contrato con un contratista independiente; o
- (4) contratar a un contratista constructor/diseñador.

Para los tres últimos planteamientos de construcción, es necesario preparar un juego detallado de documentos para la cotización que pueda usar el cotizador para preparar una cotización consistente. Las ventajas de guiar al contratista a través de un proceso de cotización competitiva incluyen:

- (1) menor costo de construcción, como resultado de la naturaleza competitiva del proceso de cotización;
- (2) responsabilidades bien definidas de cada participante del contrato de construcción y términos bien definidos del contrato de construcción; y
- (3) documentación de la información que el contratista utiliza para preparar su cotización, la cual resulta valiosa si se requieren adiciones o sustracciones al presupuesto o al contrato de trabajo.

Las desventajas de un trabajo competitivo de cotización son:

- (1) la formalidad requerida, la cual requiere una preparación de planos detallados y documentos legales, algunas veces a costos significativos; y
- (2) dificultades por emitir un criterio "subjetivo" en la evaluación de la cotización, como las calificaciones del contratista por el desempeño del trabajo y su desempeño en trabajos similares anteriores.



PASO 6. CONFIRMAR LA EFECTIVIDAD DEL DISEÑO.

El paso final del programa de remediación es confirmar la efectividad del sistema en lograr la meta de remediación. La efectividad del sistema puede evaluarse revisando los datos de un programa de monitoreo y evaluar si se satisfacen o no las metas de remediación o los criterios de efectividad; debe evaluarse durante el comienzo de operación y a intervalos específicos de tiempo después del arranque. Para confirmar la efectividad de un sistema de diseño a base de bombeo-tratamiento del agua subterránea proyectado para prevenir la migración de contaminantes más allá de la línea de los pozos de extracción, el sistema debe monitorearse a fin de asegurar que el agua gradiente abajo de los pozos de extracción no exceda los criterios de limpieza. Si el sistema está diseñado para remover contaminantes en el acuífero, entonces el agua subterránea acumulada por los pozos de remoción pueda analizarse para confirmar que la calidad del agua subterránea se mejora como se predijo. Como un paso subsecuente a la evaluación de la eficiencia del sistema de remediación este debe modificarse según las necesidades para mejorar la capacidad del sistema de alcanzar las metas de remediación y lograr los criterios. El programa de monitoreo del desempeño debe contener los criterios para parar el sistema, también debe contener criterios para reevaluar lo adecuado del diseño y si el sistema falló encontrar el arreglo en los criterios de diseño.

4.4 CONTENCIÓN HIDRÁULICA PARA EL AGUA SUBTERRÁNEA.

Existen muchas alternativas para proveer la contención hidráulica del agua subterránea. Las más utilizadas son las barreras físicas e hidráulicas. Por lo que esta sección se centrará en barreras físicas, barreras hidráulicas y algunos métodos de contención hidráulica novedosos.

• BARRERAS FÍSICAS.

Las barreras físicas son formaciones verticales en el suelo que proveen una barrera contra el flujo del agua subterránea; pueden ser formadas usando diversos materiales pueden ser tanto no selectivos (barrera contra el flujo de toda el agua subterránea) como selectivas (barrera contra la migración de los contaminantes seleccionados). En esta sección, solo se discuten barreras físicas no selectivas; las más usadas son: suelo de bentonita, cemento de bentonita, tubo de biopolímero, inyección de lechada, cortina de lechada, cortina de pilotes, barreras geoquímicas.

Las barreras físicas más antiguas y comúnmente usadas son cortes en paredes. Los cortes en pared limitan la migración del agua subterránea formando un impedimento físico para que fluya el agua subterránea. La efectividad de la pared está en función de su continuidad, su resistencia a la degradación de los contaminantes en el agua subterránea y su resistencia a la degradación física. Debido a que se impide el flujo del agua subterránea, su elevación puede incrementarse en el lado de la barrera a favor del gradiente; para prevenir el desbordamiento o filtración en la barrera de los contaminantes del agua subterránea, se requieren controles adicionales como:

- (1) pozos de extracción del agua subterránea o trincheras adyacentes a la barrera para conducir el agua subterránea elevada hasta un punto de descarga; o
- (2) segmentos permeables en la barrera para permitir el paso directo del agua hasta sitios controlados en la pared.

Las paredes inyectadas con suelo-bentonita son el tipo más común de barrera física usada en los proyectos de remediación geotécnicos y ambientales. La construcción de una pared inyectada consiste en formar una mezcla de suelo (u otro material) y arcilla bentonita dentro de una zanja vertical para formar una barrera vertical de muy baja permeabilidad contra el flujo. Un diseño general para la construcción de una pared inyectada incluye:

- (1) la excavación de una zanja vertical angosta (alrededor de 0.6 m a 1 m) (si la zanja no es apuntalada tiende a colapsarse, entonces debe estabilizarse temporalmente usando bentonita inyectada); y
- (2) colocar la mezcla suelo-bentonita en la zanja de tal manera que desplace la bentonita inyectada y forme una pared vertical continua de material suelo-bentonita de baja permeabilidad.



Una mezcla típica de suelo-bentonita contiene alrededor del 2 al 4% de arcilla bentonita, 20 al 35% de agua, 15 al 40% de suelo fino que pasa la criba No. 200 y del 40 al 60% de material grueso retenido en la criba No. 200. En muchos casos, el material excavado de la zanja puede usarse como una fuente económica del componente suelo de la mezcla suelo-bentonita. Los factores que deben considerarse para seleccionar la fuente de suelo para mezclarse con la bentonita incluyen:

- (1) clasificación del tamaño del grano en el suelo;
- (2) tratamiento y/o costo para los suelos que son contaminados en la excavación de la zanja, y
- (3) la composición química del suelo (el suelo que es contaminado por metales o Compuestos Orgánicos Volátiles puede inhibir la capacidad de la bentonita para hidratarse y comprometer la permeabilidad de la pared.

La eficiencia de una pared inyectada de suelo-bentonita para prevenir el flujo a través de la pared está en función de:

- (1) el medio de la pared (la naturaleza de los químicos del agua subterránea a los cuales la mezcla suelo-bentonita estará expuesta);
- (2) el porcentaje de arcilla bentonita usada en la mezcla suelo-bentonita;
- (3) el tipo y granulometría del suelo usado, medido como un porcentaje del suelo que pasa la criba No. 200.; y
- (4) la calidad de construcción de la pared.

Cuando se diseña una pared inyectada con suelo-bentonita, las pruebas de conductividad hidráulica son realizadas en varias mezclas de suelo y bentonita; los resultados de la prueba se usan para seleccionar las proporciones de suelo y bentonita que producen la conductividad hidráulica deseada. Se sabe que la conductividad hidráulica más baja en el sitio, que puede alcanzarse mediante una pared inyectada de suelo-bentonita, se encuentra entre 10^{-5} cm/seg y 10^{-7} cm/seg, en donde las conductividades hidráulicas en el rango menor son alcanzables bajo circunstancias ideales y utilizando excelentes prácticas de construcción. El funcionamiento de una pared inyectada de suelo-bentonita puede verse afectada desfavorablemente por la exposición de la pared a los Compuestos Orgánicos Volátiles, sales acuosas o NAPLs (Fase Líquida no acuosa). Sai y Anderson (1992) reportaron un incremento de 2 a 3 ordenes de magnitud en la conductividad hidráulica para inyecciones de suelo-bentonita que fueron permeadas con los Compuestos Orgánicos Volátiles, xileno y metanol, mejorar la resistencia de la pared inyectada con la adición de carbón activado.

• BARRERAS HIDRÁULICAS.

El término *barrera hidráulica* se usa para describir una estructura que causa una depresión en la superficie piezométrica del agua subterránea y funciona como una barrera a través de la cual no existe flujo de agua dentro de la zona de influencia. Las barreras hidráulicas pueden construirse usando trincheras, pozos u otras estructuras que remuevan el agua subterránea, de tal manera que existe una depresión en la superficie potenciométrica. Los tipos más comunes de barreras hidráulicas son las trincheras colectoras y pozos de extracción.

TRINCHERAS COLECTORAS. Las trincheras pueden instalarse en un acuífero para inducir una barrera hidráulica. Para su diseño, se debe identificar la profundidad a la cual la trinchera debe ser construida para producir la barrera hidráulica. La profundidad de la trinchera debe seleccionarse basándose en la consideración de la elevación del agua subterránea por variaciones estacionales para la localización de los contaminantes y la profundidad de los contaminantes en el acuífero. Las trincheras pueden ser más eficientes en costo que los pozos para extraer el agua subterránea si los contaminantes se localizan a poca profundidad por debajo del suelo (menos de 15m) y los materiales en el acuífero son relativamente fáciles de excavar (por ejemplo, no excavación de suelo rocoso). La profundidad de influencia de una trinchera colectoras en un acuífero homogéneo, isotrópico puede estimarse usando la ecuación (Zheng 1988):

$$D = \left(\frac{2S}{\pi} \right)^{1/2} \quad (1)$$



$$S = 2a(h_0 - h_d) \quad (2)$$

donde:

D = profundidad de la zona de influencia, en (pies)
a = mitad del ancho de la trinchera, en (pies)
h₀ = altura del acuífero debajo de la trinchera, en (pies)
h_d = altura de la trinchera, en (pies)

El flujo del agua subterránea hacia la trinchera por unidad de ancho de la trinchera se puede estimar usando la siguiente ecuación:

$$Q = KiD \quad (3)$$

donde:

Q = flujo volumétrico hacia la trinchera, en (pies³/seg)
K = conductividad hidráulica del material en el acuífero (pies/s)
i = nivel del gradiente en el acuífero
D = profundidad de influencia de la trinchera (pies)

Las ecuaciones (1) y (3) aplican sólo para acuíferos isotrópicos, homogéneos; para acuíferos que contienen variaciones estratigráficas vertical o horizontal o anisotrópicos, se requiere un modelo más complejo. En tales medios, el diseñador debe ser conciente de la presencia de tales características y aumentar la profundidad o la anchura de la trinchera para interceptar el agua subterránea contaminada que podría fluir hacia estas estructuras.

• POZOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA.

Los pozos también pueden instalarse en un acuífero para inducir una barrera hidráulica al flujo del agua subterránea. Un pozo de extracción típico para agua subterránea se ilustra en la **Figura 4.3** El radio y la profundidad de influencia de un solo pozo pueden calcularse basándose en las propiedades del acuífero, la geometría del pozo (profundidad y radio) y el régimen de bombeo del pozo. La zona de influencia de un pozo sencillo, en un acuífero confinado, isotrópico y homogéneo que tiene gradiente cero puede ser estimado como (USEPA, 1994a):

$$W = Q/Ti \quad (4)$$

donde:

W = ancho de la zona de influencia, en (pies)
Q = régimen de bombeo del pozo de extracción, en (pies³ seg⁻¹)
T = transmisividad del acuífero confinado (o el equivalente de transmisividad de un acuífero no confinado), en (pies² sec⁻¹)
i = gradiente hidráulico (adimensional)

Para pozos en acuíferos no confinados las zonas de influencia pueden estimarse usando esta ecuación pero sustituyendo: Kb (b es el espesor completo del acuífero no confinado en el pozo bombeado) por T si la profundidad es pequeña comparada con la anchura del acuífero. El uso de modelos matemáticos puede lograr cálculos más exactos para estimar la geometría de la zona de captación en acuíferos no confinados. El valor de Q en la ecuación (4) puede estimarse para pozos que penetren totalmente en un acuífero no confinado de gradiente cero, en donde el cono de abatimiento es pequeño en comparación con la profundidad del acuífero, como:



$$Q = \pi K \left[\frac{H_o^2 - H_w^2}{\ln \left(\frac{r_o}{r_w} \right)} \right] \quad (5)$$

donde:

Q = gasto de bombeo, en (pies³/seg)

K = conductividad hidráulica en el acuífero, en (pies/seg)

H_o = carga hidráulica en el límite de la zona de influencia, en (pies)

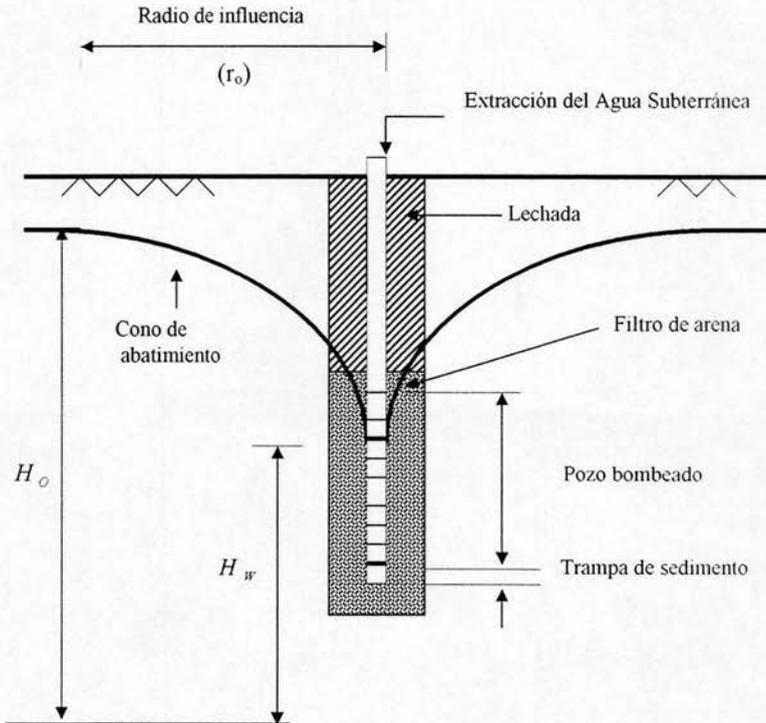
H_w = carga hidráulica en el pozo, en (pies)

r_o = distancia del pozo de bombeo al límite de la zona de influencia, en (pies)

r_w = radio del pozo bombeado, en (pies)

Cuando se evalúa la zona combinada de influencia de una red de pozos de extracción, debe examinarse la localización del punto de estancamiento y el traslape de zonas de influencia adyacentes. Para acuíferos donde el gradiente hidráulico es inclinado, el camino que toma el flujo del agua hacia los pozos en red, puede pasar entre y más allá de los pozos en red. Para minimizar este problema, las zonas de influencia deben traslaparse significativamente (pozos que deben separarse a una distancia de $Q/\pi T_i$ para dos pozos de extracción y un poco más para el incremento del número de pozos de extracción (USEPA 1994a).

Figura 4.3 Pozo de extracción de agua subterránea.



**• OTRAS OPCIONES DE CONTENCIÓN HIDRÁULICA.**

En años pasados han sido desarrollados numerosos planteamientos alternativos de contención hidráulica. A continuación se describen algunos planteamientos:

- Drenes Horizontales (USEPA, 1985, Cohen y Miller, 1993) producen una barrera para el flujo del agua subterránea de una manera similar a las trincheras. Con los recientes avances de las tecnologías de perforación direccional, la precisión de realizar drenes horizontales ha mejorado significativamente. Los drenes horizontales pueden ser útiles en localidades donde no se puede excavar una trinchera.
- Las Geomembranas (Rumor y Mitchell, 1995) pueden ser incorporadas dentro de las barreras verticales para proveer una barrera con permeabilidad extremadamente baja. Las geomembranas ofrecen excelente compatibilidad con los contaminantes del subsuelo y tienen propiedades muy uniformes. Sin embargo, para que la barrera funcione correctamente las uniones entre los paneles de geomembranas adyacentes deben efectuarse cuidadosamente para prevenir goteos en estos puntos. Algunos métodos de instalación de barreras con geomembranas en pozos comúnmente usados son resumidos en la **Tabla 4.9**.
- Pozos Indicadores (Driscoll, 1986) son dispositivos discretos de extracción de agua subterránea que están perforados o sumidos en el suelo. Son útiles para acuíferos donde no se requiere un filtro y el agua está a poca profundidad. El agua subterránea se extrae por succión o usando técnicas de elevación por aire; ya que el bombeo no se usa en este tipo de sistema.

TABLA 4.9 MÉTODOS DE INSTALACIÓN PARA BARRERAS EN POZOS CON GEOMEMBRANAS

Método No	Método o Técnica	Configuración de la Geomembrana	Apoyo de la Trinchera	Ancho de la Trinchera (mm)	Profundidad de la Trinchera (m)	Tipo de Relleno
1	Maquinaria para zanjas	Continua	Ninguno	300-600	1.5-4.5	Arena o suelo nativo
2	Inserción con placa vibratoria	Paneles (tableros)	Ninguno	100-150	1.5-6.0	Suelo nativo
3	División de zanjas encajonadas	Paneles o continuos	Ninguno	900-1200	3.0-9.0	Arena o suelo nativo
4	Onda vibratoria	Paneles	Lechada	150-220	Sin limite	Lechada de SB, SC, CB, SCB

SB = suelo-bentonita; SC = suelo-cemento; CB = cemento-bentonita; SCB = suelo-cemento-bentonita



4.5 DISEÑO DE SISTEMAS PARA LA EXTRACCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

En esta sección se presentan características para el diseño de sistemas para la extracción del agua subterránea. Los sistemas de extracción del agua subterránea son una combinación de dispositivos subterráneos (pozos y trincheras, los cuales proporcionan acceso al agua subterránea contaminada) y dispositivos sobre el suelo (los cuales son usados para regular y monitorear el proceso de extracción).

• SISTEMAS DE POZOS DE EXTRACCIÓN.

Los pozos de extracción son más eficientes en costo para remover agua subterránea que las trincheras si la profundidad de la contaminación es grande o si la construcción de la trinchera a la profundidad requerida en el acuífero es compleja. En apoyo a los pozos de extracción, estos sistemas contienen bombas, fuentes de energía y los controles que son requeridos para remover el agua subterránea contaminada del acuífero y transportarla hacia los sistemas de tratamiento. Un diagrama esquemático de un sistema típico de pozos de extracción se presenta en la **Figura 4.4**. Los componentes del sistema son:

- **Pozo.** El pozo da acceso al agua subterránea en el acuífero. El pozo podría ser diseñado usando las técnicas descritas, excepto que el diseño de un pozo de extracción debe ser diferente del diseño de un pozo de monitoreo para mejorar a largo plazo el funcionamiento del pozo de extracción y minimizar las necesidades de mantenimiento.
- **Bomba y Motor.** La bomba acarrea el agua subterránea desde el acuífero hasta la cabeza del pozo en la superficie. El motor y la bomba deben seleccionarse según las condiciones específicas de operación que existirán durante la extracción del agua subterránea. En la **Tabla 4.10** se presenta información de varios tipos de bombas que se usan en los pozos de extracción.
- **Cabeza del Pozo.** La cabeza del pozo es la parte superficial que contiene los aditamentos que se usan para transportar el agua subterránea del pozo de extracción a la línea de transmisión. Los componentes típicos para ensamblar la cabeza del pozo incluyen válvulas, instalaciones, medidores de flujo, medidores de presión y muestreadores. La cabeza del pozo puede diseñarse para estar en la superficie o debajo del suelo, dependiendo del uso del área alrededor del pozo.
- **Tubería de Transmisión.** La tubería de transmisión es usada para transmitir el agua subterránea extraída de la cabeza del pozo hasta el sistema de tratamiento o descarga. Debe considerarse cuando se diseñe la tubería:
 - (1) la cantidad de flujo requerido
 - (2) daños debido a tensiones de sobrecarga, incluyendo tensión causada por vehículos
 - (3) resistencia de la tubería a la degradación causada por los contaminantes en el agua subterránea, y
 - (4) sistema constructivo de la tubería
- **Fuente de Energía.** Las fuentes de energía son componentes necesarios para la operación del sistema de extracción. El potencia puede ser suministrada por electricidad, aire comprimido, energía solar o por gas natural.
- **Tablero de Control Electromecánico.** El tablero de control contiene controles eléctricos para el sistema de extracción. Las funciones que son controladas en el tablero incluyen tiempo cíclico de bombeo, temperatura de bombeo, condiciones de alarma para monitoreo y transmisión de los datos recolectados en la cabeza del pozo hacia una unidad de procesamiento central.
- **Punto de Descarga.** El punto de descarga es el sitio en el cual el agua subterránea extraída es transferida a un sistema de tratamiento o punto definitivo de descarga.

Es recomendable que los siguientes factores sean considerados cuando se diseñe un sistema de extracción de agua subterránea (Driscoll, 1986):



- Debido a la gran cantidad de agua que fluye en el pozo de extracción deben especificarse materiales muy durables y el área descubierta del pozo debe maximizarse equilibrada con las especificaciones de resistencia del ademe.
- Antes de la selección final de los materiales y de los componentes del sistema de extracción, debe examinarse cuidadosamente la compatibilidad química del agua subterránea contaminada con cada componente de la extracción, transmisión y sistemas de bombeo.
- La salud y seguridad del personal que instale el pozo debe considerarse cuando se desarrolle el Plan para la instalación del pozo de extracción.
- Debe evaluarse el impacto de eventos de ocurrencia natural tanto en la durabilidad como en el desempeño del sistema de extracción, incluyendo los efectos de pH alto y bajo (un pH significativamente inferior a 7 indica acidez, posibilidades de condición corrosiva), oxígeno disuelto (mayor que 0.0002 mg/l indica posibilidades de condición corrosiva), hierro (menos de 0.25 mg/L puede causar obstrucciones en el ademe del sistema de tratamiento), sulfuro de hidrógeno (menos de 1 mg/L puede ser corrosivo), sólidos disueltos (mayor que 1.000 mg/L pueden causar corrosión eléctrica), dióxido de carbono (mayor que 50 mg/L puede producir ácido carbónico y resultando condiciones de corrosión) y condiciones de incrustación (a pH > 7.5, dureza > 300 mg/L, hierro > 0.5 mg/L o manganeso > 0.2 mg/L).

Figura 4.4 Sistema de extracción de agua subterránea.

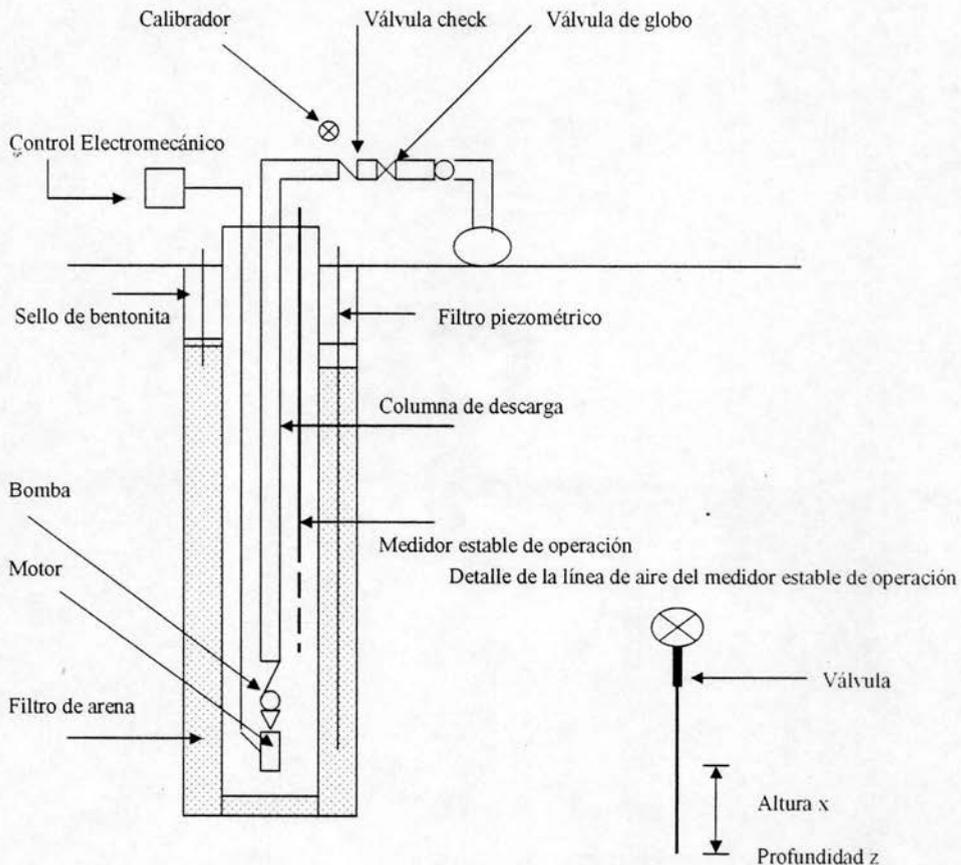




TABLA 4.10 INFORMACIÓN DEL BOMBEO Y TRASLADO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Tipo de bomba	Elevación de succión (m)	Profundidad normal de bombeo (m)	Presión normal (m)	Ventajas	Desventajas
1. Desplazamiento positivo	6.7-7.6	6.7-7.6	30.5-671	1. El agua bombeada contiene arena y limos. 2. Especialmente adaptada para baja capacidad y altas elevaciones.	1. Sujeto a vibraciones y ruido. 2. El costo del mantenimiento podría ser alto.
2. Eyector					
a. Pozo somero	4.6-6.1	4.6-6.1	24-46	1. Alta capacidad bajas presiones. 2. Operación simple.	1. Se reduce la capacidad a medida que se incrementa la elevación. 2. La succión de aire o la línea de retorno detendrá el bombeo.
b. Pozo profundo	4.6-6.1	7.6-37	24-46	1. Las mismas que un pozo somero. 2. Estabilidad no crítica del pozo.	1. Las mismas que un pozo somero. 2. Baja eficiencia, a elevaciones muy altas.
3. Pozo somero centrifugo					
a. Velocidad centrifuga directa (fase única)	6.10 máx.	3-6.1	30.5-46	1. El agua bombeada contiene arena y limo. 2. Usualmente seguro y buena vida útil.	1. Se pierde la purga fácilmente. 2. La eficiencia depende de la operación bajo las características de diseño y la velocidad.
b. Tipo de turbina regeneradora (impulsor sencillo)	8.5 máx.	8.5	30.5-61	1. Las mismas que la centrifuga directa excepto que no son convenientes para bombear agua que contienen arena o limo. 2. Auto purga.	1. Las mismas que la centrifuga directa excepto que se mantienen purgadas fácilmente



4. Pozo profundo					
a. Impulsores sumergibles verticales (multifase)	N/A (impulsor sumergible).	15.2-91.5	30.5-244	<ol style="list-style-type: none"> 1. Las mismas que la turbina de pozo somero. 2. Todos los componentes eléctricos están accesibles en la superficie. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La eficiencia depende de la operación bajo las características de diseño y la velocidad. 2. Se requiere un pozo recto y grande.
b. Turbina sumergible (multifase)	N/A (bomba y motor sumergido)	15.3-122	15.3-122	<ol style="list-style-type: none"> 1. Las mismas que la turbina de pozo somero. 2. Motor de flecha corta. 3. Operación silenciosa. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La reparación requiere extraerla del pozo. 2. Resulta crítico el sellado del equipamiento eléctrico. 3. Abrasión de arena.

• TRINCHERAS COMO SISTEMAS DE EXTRACCIÓN.

El sistema de trincheras resulta más eficiente en costo que los pozos de extracción si la profundidad de la contaminación es somera y cuando es sencillo instalar la trinchera a la profundidad requerida. Antes de iniciar el diseño detallado del sistema de trincheras, el profesional debe tener ya identificada la profundidad de la trinchera y la localización de ésta. Un sistema de trincheras consiste únicamente de bombas, fuentes de energía y controles que se requieren para remover el agua subterránea contaminada de la trinchera. Las características del sistema son:

- **Trinchera.** Las trincheras usadas para la extracción de agua subterránea pueden instalarse usando varios métodos; estos materiales deben diseñarse para resistir la degradación por los químicos del agua subterránea a los que estarán expuestos y resistir los daños causados por las tensiones a las que estarán expuestas.
- **Bombas.** Las bombas deben diseñarse usando el criterio para pozos de extracción. Debido a que el ancho de las trincheras es de varios pies, pozos de gran diámetro se pueden colocar en la trinchera, los cuales pueden soportar bombas grandes. Las bombas grandes se pueden diseñar para resistir la obstrucción por partículas de suelo, tienen mayor vida de servicio y son más seguras y menos costosas para mantener que las bombas pequeñas. Debe instalarse un vertedero en cada punto bajo de la trinchera.
- **Punto de descarga, panel de control, fuente de energía, tuberías de conducción.** Estos dispositivos pueden diseñarse usando las recomendaciones presentadas para los sistemas de pozos de extracción.



4.6 TIEMPO REQUERIDO PARA LA EXTRACCIÓN DE LA PLUMA CONTAMINANTE EN EL AGUA SUBTERRÁNEA.

Durante los últimos 20 años, uno de los principales propósitos en la extracción del agua subterránea contaminada de un acuífero era restaurar el acuífero para su uso, pero actualmente el propósito es eliminar del acuífero el agua subterránea contaminada. En esta sección, el concepto de restauración de un acuífero se revisa desde el punto de vista del uso y de la meta razonablemente alcanzable de limpieza y restauración. La restauración del acuífero se basa en el concepto de qué cantidad de agua subterránea debe ser removida, la restauración del acuífero puede calcularse basándose en las propiedades físicas del acuífero. Si la fuente de contaminación y el flujo uniforme del agua subterránea prevalece, el tiempo requerido para restaurar el acuífero mediante la extracción de agua con pozos y trincheras puede estimarse dividiendo:

- (1) la distancia de la parte más lejana de la pluma contaminante a los pozos de extracción o trincheras, en (pies); entre
- (2) el régimen del flujo del agua subterránea, en (pies/día)

El volumen de agua bombeada bajo este escenario es igual al tiempo de limpieza para el régimen combinado de bombeo de todos los dispositivos de extracción.

La experiencia demuestra, que factores como la sorción, hidrólisis, solvatación/ionización, volatilización/disolución, complejación, oxidación/reducción y biodegradación, pueden incrementar o disminuir el tiempo requerido para la remediación. De estos factores, la sorción tiene el mayor impacto en la limpieza, aunque otros factores podrían tener un mayor impacto dependiendo de las características específicas del sitio y de los contaminantes que están presentes en el agua subterránea. Sorción es igual a los procesos de:

- (1) adsorción de contaminantes disueltos en el agua subterránea en la superficie de las partículas de suelo, y
- (2) consecutiva disolución de los contaminantes en las partículas de suelo cuando las condiciones de equilibrio en el acuífero cambian.

Como las condiciones de equilibrio en el acuífero cambian, la disociación de contaminantes entre la fase disuelta y la sólida cambian, provocando que los contaminantes sean adsorbidos del agua a las partículas de suelo o desorbidos del suelo hacia el agua. Los contaminantes resultan adsorbidos a las partículas de suelo como resultado de fuerzas electroquímicas (reacciones de intercambio iónico o fuerzas de Van der Waals) entre las partículas de suelo y los contaminantes disueltos. En la **Tabla 4.11** se presentan los coeficientes de disociación para algunos contaminantes orgánicos.

Los iones que tienen una carga de valencia alta (Cr^{+6} , Al^{+3}) y moléculas que son grandes (compuestos con base en cloro) o de cadena larga tienden a adsorber fuertemente las partículas de suelo.

Debido a que los contaminantes desorbidos pueden impactar negativamente la calidad del agua, los materiales del acuífero que han adsorbido contaminantes actúan como una fuente continua de contaminación para el agua, permitiendo al agua no contaminada fluir a través del agua contaminada hasta que todo el material adsorbido se desorbe.



TABLA 4.11 CARACTERÍSTICAS DE DISOCIACIÓN DE COMPUESTOS QUÍMICOS

Químico	Solubilidad del Agua (mg/L)	Presión de Vapor (atm)	Constante de la Ley de Henry, K_H (atm·m ³ /mol)	Coefficiente disociación en Carbón Orgánico K_{OC} (L/Kg)
Aldrin	1.80×10^{-1}	7.89×10^{-9}	1.60×10^{-5}	9.60×10^4
Benceno	1.75×10^3	1.25×10^{-1}	5.59×10^{-3}	8.30×10^1
Cloroetano	5.74×10^3	1.32×10^0	6.15×10^{-4}	1.70×10^1
DDT	5.00×10^{-3}	7.24×10^{-9}	5.13×10^{-4}	2.43×10^5
Tetracloroetano(PERC)	1.50×10^2	2.30×10^{-2}	2.59×10^{-2}	3.64×10^2
Tricloroetano(TCE)	1.10×10^3	7.60×10^{-2}	9.10×10^{-3}	1.26×10^2
Cloruro de Vinilo	2.67×10^3	3.50×10^0	8.19×10^{-2}	5.7×10^1

Hay numerosos modelos disponibles que sirven para valorar el tiempo requerido para limpiar un acuífero para el cual los efectos de sorción son importantes. Los modelos se clasifican desde simples (modelo de flujo en serie que usa un esquema hidráulico sencillo o el esquema dispersivo-advectivo) hasta complejos (modelos de elemento-finito). Un método analítico exacto y de simple razonamiento para estimar el tiempo y la cantidad de agua subterránea extraída requerida para limpiar un acuífero es el modelo de flujo en serie. El modelo de flujo en serie se basa en las suposiciones ideales:

- (1) una vez contaminada el agua se mezcla perfectamente con el acuífero, y
- (2) la sorción es lineal, reversible y rápida.

Este análisis no cuenta para dispersiones o acuíferos anisotrópicos, no homogéneos o cualquier otro mecanismo de transporte de contaminantes. El esquema de flujo en serie se basa en la explícita aproximación de diferencia finita de la ecuación diferencial unidimensional para transporte de agua subterránea, la cual es:

$$V_o \frac{dC}{dt} + \rho \frac{V_o}{n} \frac{dS}{dt} = -QC \quad (6)$$

donde:

C = concentración del contaminante en el agua	(mg/L)
S = concentración de la fase absorbida del contaminante	(mg/L)
V_o = volumen del agua contaminada	(m ³)
ρ = densidad media de la masa porosa	(g/m ³)
n = porosidad efectiva	(adimensional)
Q = velocidad de extracción volumétrica del agua subterránea	(m ³ /seg)
t = tiempo	(seg)

Debido a que la sorción es lineal, reversible y rápida, S puede ser sustituida por $K_d C$, donde K_d es el coeficiente de distribución suelo-agua. Sustituyendo y arreglando las ecuaciones son:

$$T_t = R \left[- \ln \frac{C_t}{C_o} \right] \quad (7)$$



$$t_t = \frac{V_o}{Q} T_t \quad (8)$$

donde:

C_o = concentraci3n inicial del contaminante en el acuífero.

T_t = volúmenes de poro que deberá extraerse para limpiar el acuífero hasta la concentraci3n deseada (C_t).

t_t = tiempo requerido para alcanzar (C_t).

En las ecuaciones 7 y 9, el término R es conocido como el factor de retardaci3n y se define como:

$$R = 1 + \frac{\rho}{n} K_d \quad (9)$$

Los valores de K_d pueden calcularse en el laboratorio; sin embargo debido a que el valor de K_d es una funci3n de la sorci3n del material orgánico, una aproximaci3n de K_d puede encontrarse usando la ecuaci3n:

$$K_d = K_{oc} \times f_{oc} \quad (10)$$

donde:

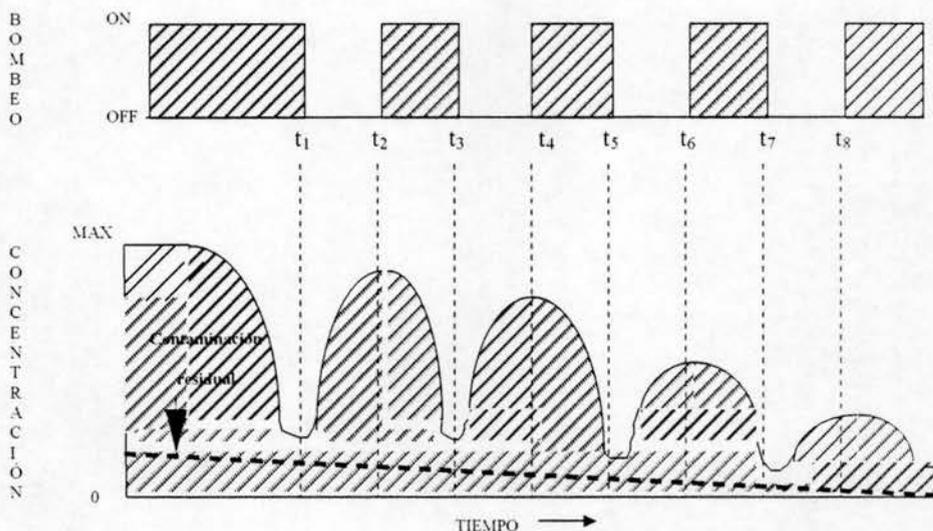
K_{oc} = constante de proporcionalidad conocida como "coeficiente de repartici3n suelo-agua normalizado con respecto al carb3n orgánico" puede ser estimada basándose en el coeficiente de partici3n octanol-agua (K_{ow}) del contaminante.

f_{oc} = fracci3n de carb3n orgánico en los suelos del acuífero.

Cálculos aproximados de K_{oc} para algunos contaminantes orgánicos comunes son previstos en la **Tabla 4.11**. Debido a que la desorci3n es una funci3n del promedio de la concentraci3n de contaminantes sorbidos entre la concentraci3n de contaminantes disueltos, debe esperarse que los contaminantes sorbidos se desorben indefinidamente, lo cual podria ser imposible para limpiar la calidad del agua subterránea en un periodo de tiempo razonable. Por la misma raz3n, los sistemas de extracci3n de agua subterránea que son operados a un rango de extracci3n podrian no remover una cantidad apreciable de contaminantes en las etapas posteriores de remediaci3n; en tales casos, planteamientos de bombeo por pulsos **Figura 4.5** podrian optimizar los procesos de remediaci3n pero minimizando la cantidad total del agua subterránea bombeada y tratada.



Figura 4.5 Uso del esquema de bombeo por pulsos para llevar al máximo la reducción de la concentración del contaminante.



Los modelos de flujo en serie son útiles para estimar los tiempos de los sistemas de limpieza para acuíferos simples en los cuales la sorción es casi lineal. Sin embargo, este modelo subestima los tiempos de limpieza debido a que no toma en cuenta los siguientes factores:

- (1) heterogeneidad
- (2) fuentes activas de contaminantes
- (3) la presencia de la fase de separación de los contaminantes: o
- (4) los efectos de la sorción no lineal.

Estas limitaciones también aplican para modelos que son más complejos que el modelo de flujo en serie. Debido a los efectos de sorción, el costo de la limpieza de un acuífero para un nivel bajo de contaminación puede ser significativamente mayor que el costo de remover contaminación elevada, como se muestra en la **Tabla 4.12**. Se puede esperar que los costos de remediación se incrementen en la medida en que los factores de retardación se incrementen **Figura 4.6** y un costo adicional real puede ser expresado el llevar a cabo eficiencias muy altas de limpieza **Figura 4.7** y **Tabla 4.12**. Si se encuentra que la meta de remediación no puede alcanzarse directamente por extracción, entonces cada una de las metas de remediación podrían ser seleccionadas o complementadas considerando otras técnicas de remediación para incrementar la eficiencia en la remediación.



TABLA 4.12 IMPACTO DE LA META DE LIMPIEZA SOBRE EL COSTO EN UN SISTEMA CONVENCIONAL DE BOMBEO Y TRATAMIENTO

Porcentaje requerido de la remediación	Años calculados para alcanzar la meta	Valor presente (dólares americanos)
80	15	\$ 2.800,000
90	21	\$ 3.250,000
99	42	\$ 4.750,000
99.9	63	\$ 5.600,000
99.99	84	\$ 6.000,000

Figura 4.6 Costo del sistema de bombeo y tratamiento como una función del factor de retardo en el contaminante.

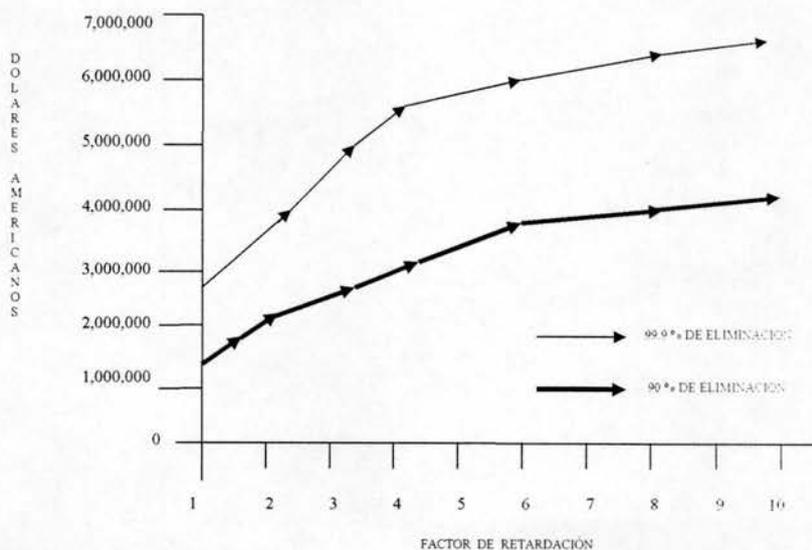
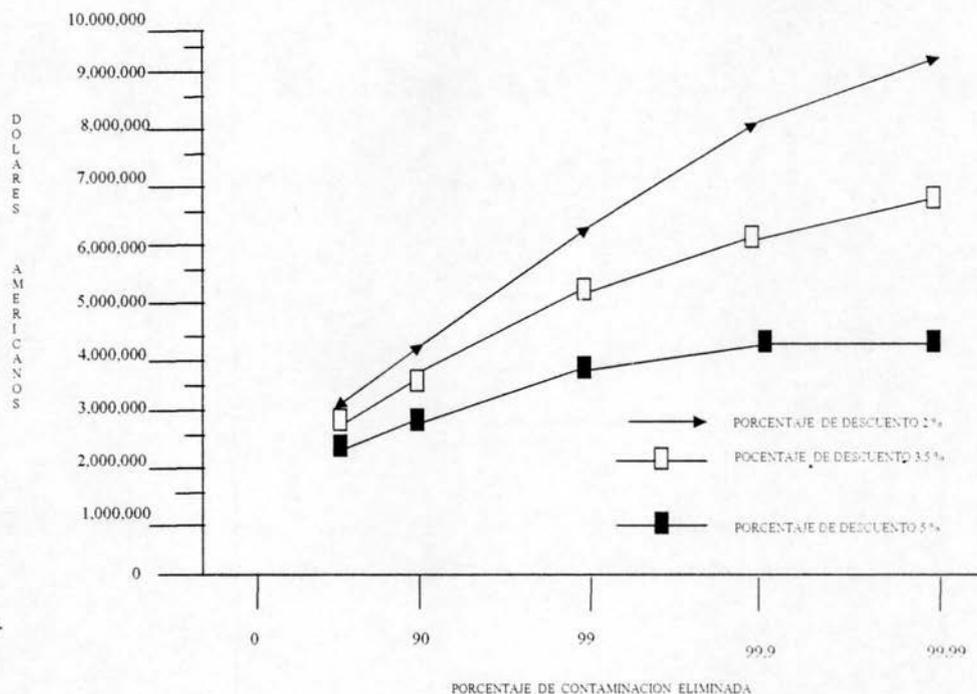




Figura 4.7 Costo del sistema de bombeo y tratamiento como una función de la meta de limpieza.



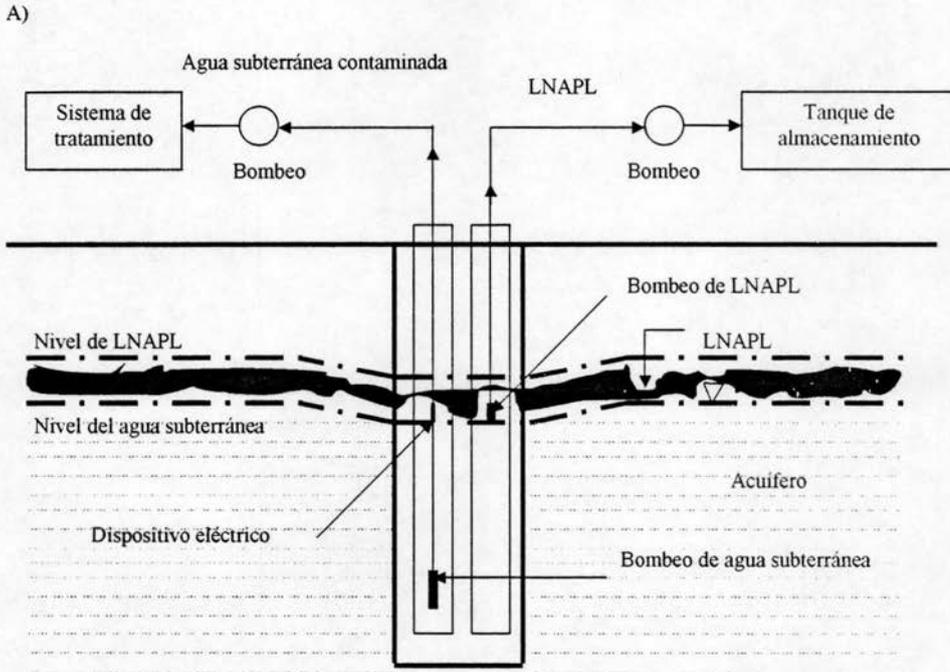
OTROS PLANTEAMIENTOS PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA.

Hay muchos planteamientos disponibles en la extracción del agua subterránea además de pozos verticales y trincheras, incluyendo tanto propuestas innovadoras para remover el agua subterránea como propuestas que incrementen la extracción de contaminantes del subsuelo. Otras técnicas de extracción de agua subterránea son el uso de pozos horizontales y pozos indicadores. Las más prometedoras propuestas para incrementar la eficiencia de la extracción incluyen la fractura hidráulica (fracturar la superficie usando agua a presión o explosivos para incrementar la permeabilidad del medio y la eficiencia de la extracción del agua subterránea), descarga de agua (reinyectar agua tratada gradiente arriba de la fuente para incrementar el gradiente hidráulico del dispositivo de extracción) descarga surfactante o extracción química (descarga usando surfactantes u otros químicos diseñados para incrementar la movilidad o solubilidad de los contaminantes en el acuífero), descontaminación electroacústica (el uso de agitación electrocinética y acústica para reducir la tensión superficial y la viscosidad en la fase de separación de los contaminantes, incrementando su movilidad y la capacidad de extraerlos) y extracción con vapor (inyección de vapor para disminuir la viscosidad de un contaminante o para volatilizarlo). Cuando se evalúen técnicas de reinyección que impliquen el uso de químicos, se debe ser cuidadoso para evaluar el impacto potencial de los químicos.

Cuando se evalúan propuestas para la extracción del agua subterránea, debe ponerse atención a la extracción de NAPLs: ya que representan una fuente de contaminación potencial. Remover los NAPLs (Fase Líquida no acuosa) puede disminuir significativamente la cantidad de tiempo requerido para lograr la meta de remediación usando técnicas de bombeo y tratamiento. Las propuestas de fase doble de bombeo para remover ambos productos Fase Líquida "ligera" no acuosa (LNAPL) y Fase Líquida "densa" no acuosa (DNAPL): se ilustra en la **Figura 4.8**.

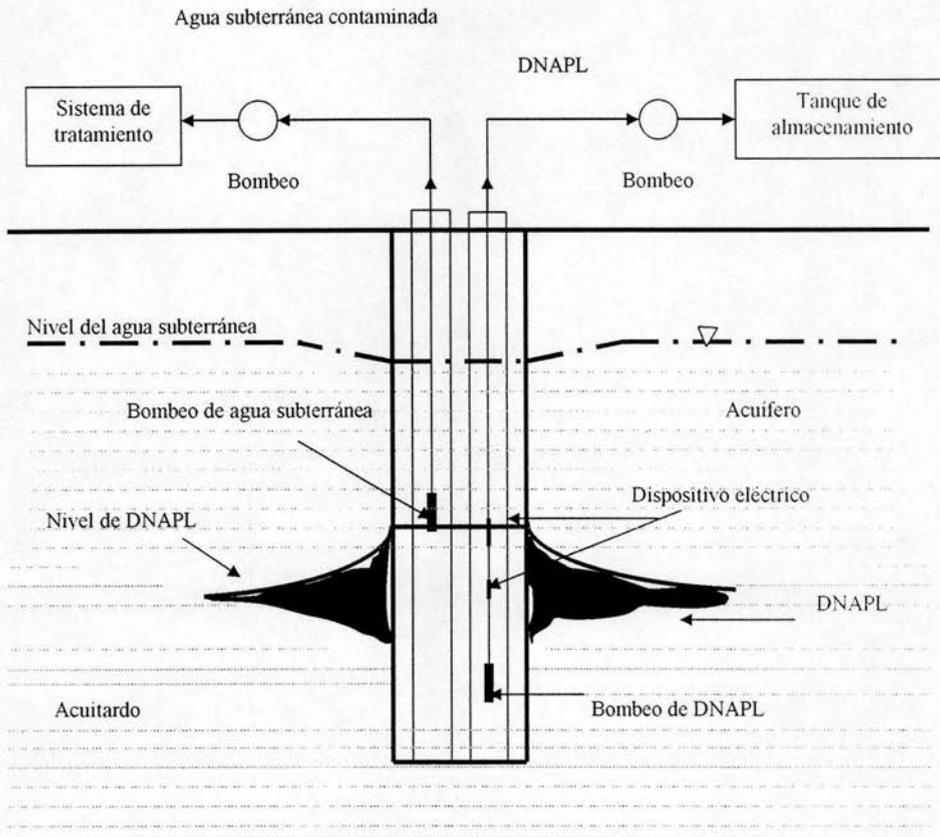


Figura 4.8 A) Sistema de extracción para LNAPL.
B) Sistema de extracción para DNAPL.





B)



4.7 SISTEMAS DE REMEDIACIÓN PARA EL AGUA SUBTERRÁNEA CONTAMINADA.

Hay muchas técnicas disponibles para el tratamiento del agua subterránea contaminada. Durante los pasados 10 años, se desarrollaron técnicas para tratamiento como las descritas por la USEPA y la Fuerza Aérea de los E.U. En esta sección, se presentan y describen las técnicas de tratamiento establecidas por Normas y las más innovadoras propuestas de técnicas de tratamiento. Tecnologías candidatas de tratamiento son tratadas en la **Tabla 4.13**, estas tecnologías son clasificadas "IN SITU" o "EX SITU". Las técnicas "in situ" intentan remover un contaminante no tóxico mediante tratamiento, o bien, extraer el contaminante del acuífero. Las técnicas "ex situ" pueden ser empleadas solo para tratar agua que ha sido extraída del acuífero.



TABLA 4.13 RESUMEN DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO

IN SITU	DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO
Bioremediación	Degradación biológica de los contaminantes usando microbios del suelo.
Sistemas de Extracción de Vapores del Suelo (SVE)	Volatilización de contaminantes que se presentan en la zona vadosa.
Inyección de Aire (AS)	Volatilización de los contaminantes en la zona de saturación.
Barreras Permeables de Reacción	Tratamiento físico o químico en una trinchera.
Extracción de Vapor por Vacío	Volatilización dentro del pozo de los contaminantes en la zona de saturación.
Convección Inducida de Densidad	Incremento de la bioremediación en el acuífero.
EX SITU	
Bioreactor	Degradación biológica de contaminantes
Inyección de Fase-Tratamiento Biológico	Variante de un bioreactor en la cual el contaminante se trata en forma de inóculo
Inyección de Aire	Volatilización de contaminantes
Adsorción por Carbón	Adsorción de contaminantes con carbón activado.
Intercambio Iónico	Los contaminantes se intercambian y son atrapados por una resina de intercambio iónico
Precipitación Alcalina	Alteración de la calidad del agua (normalmente en ajuste del pH) hasta condiciones en las cuales la concentración excede el límite de solubilidad de los compuestos, causando precipitación
Membrana	Separación de sólidos del agua usando membranas (ósmosis inversa, ultrafiltración)
Tratamiento por Humedales	Remoción de los contaminantes.
Descontaminación Electrocinética	Desorción de contaminantes mediante un "frente ácido" de agua subterránea causado por la hidrólisis de esta misma agua



• **TRATAMIENTO "IN SITU".**

Las técnicas de tratamiento "in situ" incluyen procesos biológicos (bioventeo, bioremediación), procesos de volatilización (inyección de aire, extracción por vapor). Y técnicas que incluyen un proceso químico o físico (barreras de reacción permeable). En algunos casos, las tecnologías de tratamiento "in situ" son una alternativa viable para los planteamientos de remediación más convencionales (bombeo y tratamiento) y podrían mejorar los cambios para lograr la meta de remediación definitiva (en algunos casos, hasta la restauración del acuífero).

▪ **REMEDIACIÓN BIOLÓGICA.**

La remediación biológica (bioremediación) incluye la promoción de condiciones que conducen al crecimiento de microbios que pueden degradar los contaminantes del acuífero. Numerosos tipos de microbios se presentan naturalmente en los acuíferos. Cada microbio contribuye a degradar ciertos tipos de químicos: los microbios que se encuentran comúnmente en el subsuelo son aquellos que se nutren de la materia orgánica más abundante en el acuífero. Los contaminantes se degradan por el metabolismo microbiológico, en el cual el microbio usa el contaminante como un donador de electrones para completar la respiración heterotrófica. Los subproductos que completan la biodegradación son dióxido de carbono, agua y biomasa. La biodegradación de compuestos complejos puede ocurrir en una serie de pasos, en los cuales un contaminante es degradado con varios productos intermedios antes de degradarse completamente. Por ejemplo, el tetracloruroetileno se degrada en tricloroetileno, el cual se biodegrada a dicloroetileno, el cual se biodegrada a cloruro de vinilo, el cual se biodegrada (con pasos con mucho mayor lentitud que los pasos previos) en bióxido de carbono y agua.

La bioremediación es más exitosa en acuíferos contaminados con químicos que pueden metabolizar los microbios nativos; mientras más se parece un contaminante a un compuesto presente naturalmente, más probable es que exista un microorganismo en el acuífero capaz de biodegradar el contaminante. Una ilustración de la relativa biodegradabilidad de contaminantes orgánicos se muestra en la **Figura 4.9**. Los compuestos inorgánicos no son biodegradables (pero se pueden bioacumular) y algunos compuestos inorgánicos (metales) pueden ser tóxicos para los microbios. Las condiciones ambientales dentro del acuífero tienen un efecto significativo en el éxito de la bioremediación; un resumen de los valores óptimos de los factores en el ambiente que afectan la bioremediación se presentan en la **Tabla 4.14**.

Figura 4.9 Relativa biodegradabilidad de contaminantes orgánicos.

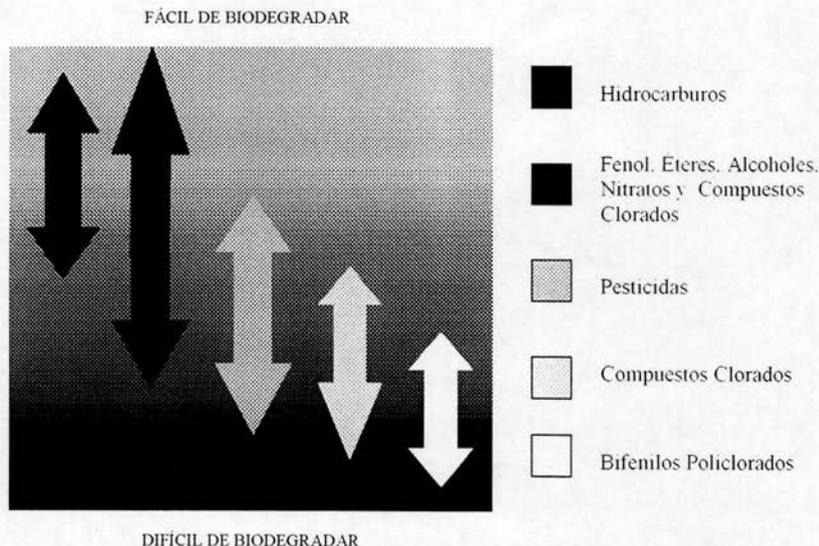




TABLA 4.14 FACTORES EN EL MEDIO AMBIENTE QUE AFECTAN LA BIODEGRADABILIDAD

Factor del Medio Ambiente	Niveles Óptimos
Disponibilidad suelo-agua	25-85% de capacidad de retención del agua
Oxígeno	Metabolismo aerobio: mayor de 0.2 mg/L de oxígeno disuelto, 10% mínimo del volumen de aire ocupado en el espacio del poro. Metabolismo anaerobio: concentraciones de oxígeno menor al 1% por volumen.
Potencial Redox	Anaerobios facultativos estrictos: mayor de 50 milivolts. Anaerobios estrictos: menor de 50 milivolts.
pH	Valores de pH entre 5.5-8.5
Nutrientes	Nitrógeno suficiente. Fósforo y otros nutrientes de manera que no se limite el crecimiento microbiano (se sugiere una proporción C:N:F de 120:10:1).
Temperatura	15-45°C (mesófilos)

La velocidad de la biodegradación y el consumo de cualquier material por la actividad biológica se expresa por la ecuación de velocidad definida como:

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_o}\right) = -kt \quad (11)$$

donde:

k = constante de velocidad de reacción de 1 ^{er} orden	(seg ⁻¹)
C _t = concentración del componente permanente en el tiempo t	(mg/L)
C _o = concentración inicial del componente	(mg/L)
t = tiempo	(seg)

C_o es medida en un laboratorio analítico y k es estimado basándose en la velocidad de la biodegradación de los contaminantes medida en el laboratorio expuesta a los microbios del acuífero. El tiempo requerido para la degradación de una pluma contaminante puede ser estimado resolviendo la ecuación 11 para "t".

Para acelerar la velocidad de la biodegradación, el sistema podría diseñarse optimizando los parámetros de la **Tabla 4.14**, que repercuten en la actividad biológica; si el contenido de oxígeno es bajo, se podría introducir oxígeno al acuífero a través de los pozos en forma de peróxido de hidrógeno o aire. El impacto de tales factores en el rango de la biodegradación se estiman basándose en los resultados de las pruebas de tratabilidad de laboratorio.



▪ PROCESO DE VOLATILIZACIÓN.

La volatilización es el cambio de un químico del estado líquido al estado gaseoso. Las técnicas de remediación que se emplean para los procesos de volatilización provocan el cambio de los contaminantes de la fase líquida a la fase de vapor. Los contaminantes en fase vapor son más fáciles de remediar que los contaminantes en fase líquida debido a que los materiales del acuífero son más permeables a vapores que a líquidos, haciendo que los vapores sean más fáciles de remover del acuífero. Las técnicas de remediación que emplean los procesos de volatilización incluyen tanto extracción de vapores del suelo (aplicable para contaminantes adsorbidos por el suelo en la zona vadosa) como inyección de aire (aplicable a contaminantes disueltos y adsorbidos en la zona de saturación). Ambos procesos se basan en el principio de la difusión molecular de los contaminantes desde la fase disuelta o no acuosa hasta la fase de vapor, el cual se describe por la Ley de Fick para la difusión. Los principios del sistema de extracción de vapores del suelo (SVE) y de inyección de aire (AS) se describen a continuación.

Sistemas de Extracción de Vapores del Suelo. Un ejemplo de SVE es ilustrado en la **Figura 4.10**. La concentración de un contaminante en el vapor extraído puede ser estimado usando la Ley de Fick como sigue:

$$C_{est} = \sum_i \frac{x_i P_i^v M_w i}{RT} \quad (12)$$

donde:

C_{est} = concentración estimada del contaminante en el vapor	(mg/L)
x_i = fracción mol del componente "i" en los contaminantes fase líquida	
P_i^v = presión de vapor del componente "i" a la temperatura "T"	(atm)
M_w = peso molecular del componente "i"	(mg/mol)
R = constante de gas (0.0821 l-atm/mol °K)	
T = temperatura absoluta del contaminante residual	(°K)

Las concentraciones del contaminante disminuyen con el tiempo en la medida en que la concentración de los contaminantes adsorbidos en el subsuelo decrece; por lo que, la concentración del contaminante en vapor cambia a través del tiempo. La SVE es compatible para contaminantes que tienen una presión de vapor propicia para la volatilización (mayor que 1×10^{-4} atm a la temperatura promedio del subsuelo); un resumen de presiones de vapor para algunos contaminantes se presenta en la **Tabla 4.11**. Usando el valor de C_{est} , se puede estimar la velocidad de remoción multiplicando C_{est} por el flujo de aire esperado Q. La velocidad del flujo de aire alcanzable se puede estimar usando la siguiente expresión (Johnson, et al. 1990):

$$\frac{Q}{H} = \pi \frac{K}{\mu} P_w \left[\frac{1 - (P_{atm} / P_w)^2}{\ln(R_w / R_i)} \right] \quad (13)$$

donde:

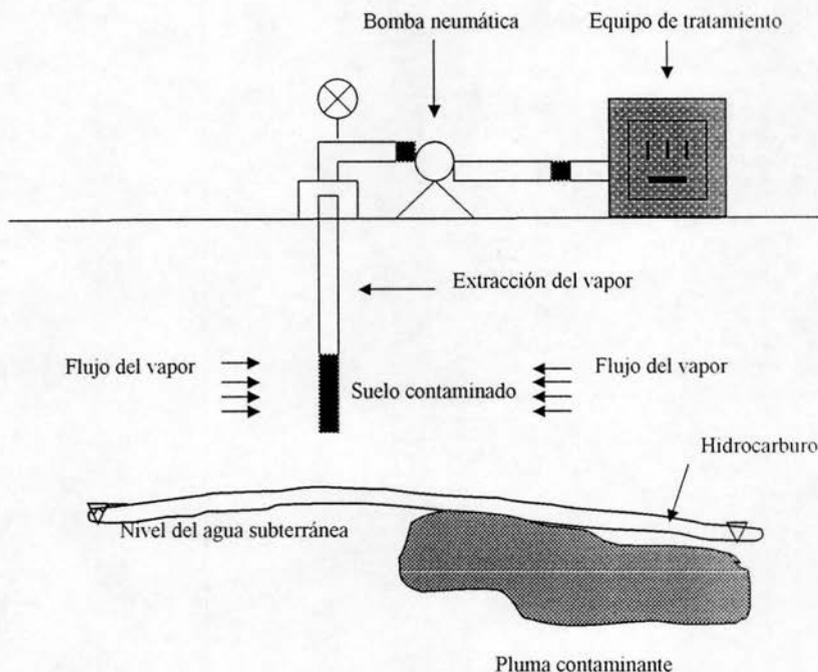
Q/H = descarga de flujo por unidad de espesor del ademe	(cm ³ /seg)
K = permeabilidad del suelo para el flujo del aire	(cm ²)
μ = viscosidad del aire	(1.8×10^{-4} g/cm-s o 0.018 cp)
P_w = presión absoluta en el pozo de extracción	(atm)
P_{atm} = presión ambiental atmosférica	(por ej. 1.01×10^6 g/cm-s ² o 1 atm)
R_w = radio del pozo de extracción	(cm)
R_i = radio de influencia en el pozo de extracción	(cm)

En algunos casos, debe existir una cantidad significativa de contaminación residual adsorbida por las partículas del suelo localizadas a poca profundidad debajo de la superficie del agua como un resultado de los cambios de elevación del agua subterránea desde que los contaminantes fueron vertidos. En este caso, debe



ser eficiente ejecutar un sistema de "doble extracción" semejante al sistema para agua subterránea y LNAPLs **Figura 4.8A**. Disminuyendo el nivel de agua por debajo de la contaminación residual puede extraerse usando técnicas de SVE, que son más eficientes que las técnicas de extracción de agua por remoción de la contaminación residual.

Figura 4.10 Sistema de extracción de vapores del suelo.



Inyección de Aire/Bioventeo. La inyección de aire consiste en introducir aire en el acuífero y permitir que salga a la superficie una vez que pasó a través del agua contaminada **Figura 4.11**. Debido a que este sistema introduce oxígeno al subsuelo, estimula la biodegradación aeróbica, por lo que esta técnica es conocida como "bioventeo". La naturaleza física del movimiento de aire en la zona saturada limita la predicción de la eficiencia del sistema de inyección de aire; las decisiones sobre ubicación y espaciado de los pozos se basan en la experiencia y no en cálculos. Con base en estudios preliminares y debido a su bajo costo la inyección de aire puede considerarse una alternativa de remediación. El aire inyectado a través de un pozo fluye hacia arriba (a la zona vadosa) a través de canales de aire que se establecieron al principio de la operación. Estos canales de aire impactan directamente en una pequeña proporción del agua y del suelo. Los contaminantes se distribuyen entre el aire inyectado, el agua y el suelo; la porción que queda en el vapor del aire inyectado llega junto con el aire a la superficie. Para que la inyección de aire sea efectiva, la masa de contaminantes adsorbidos debe ser transportada por difusión desde la superficie del suelo a través del agua hasta la interfase agua-aire de los canales de aire, lo cual es un proceso lento. Para aumentar la eficiencia de esta técnica, se recomienda usar el sistema de inyección en conjunto con un sistema SVE (el cual captura el aire inyectado después de que éste llega del agua a la zona vadosa) para prevenir la migración fuera del lugar del aire inyectado contaminado. La presión de aire requerida para operar un sistema de inyección se da en la ecuación (Johnson, et al., 1993):



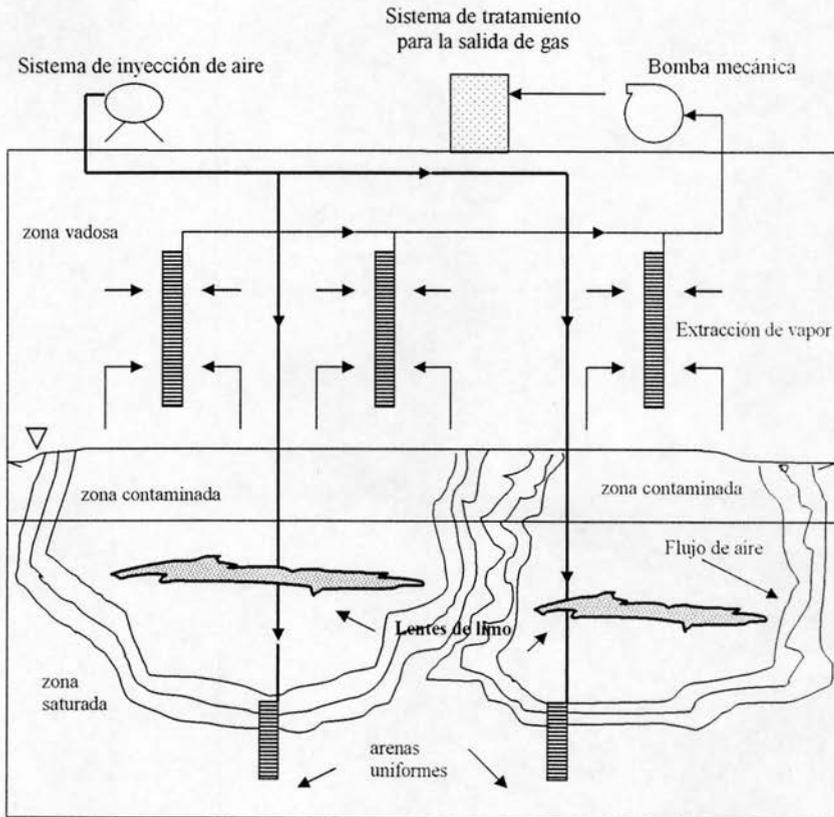
$$P_H = r_w g (L_s - L_{gw}) \quad (14)$$

donde:

- P_H = presión hidrostática columna de agua desplazada (atm)
- r_w = densidad del agua (1000 kg/m³)
- g = aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)
- L_s = profundidad debajo de la tierra al tope del ademe (m)
- L_{gw} = profundidad del agua subterránea (m)

Dos cuestiones relativas al desempeño del sistema de inyección de aire, pueden detectarse a través del monitoreo. Primero, la introducción de aire bajo la superficie debe aumentar la elevación de la superficie del agua, posiblemente cambiando la dirección del flujo del agua subterránea. Esto puede ser detectado monitoreando la elevación del agua subterránea cerca del área de estudio para confirmar que las elevaciones del agua subterránea no han cambiado. El segundo caso es que el gas inyectado podría migrar horizontalmente en zonas más permeables resultando un aumento en la extensión lateral de la contaminación. Esto puede detectarse monitoreando las características químicas del vapor en zonas más allá de los pozos de estudio, verificando que los vapores contaminados no migren fuera del sitio de manera incontrolada y, si fuera necesario, usar el sistema SVE para prevenir la migración de los vapores.

Figura 4.11 Sistema de inyección de aire.





▪ PROCESOS QUÍMICOS Y FÍSICOS.

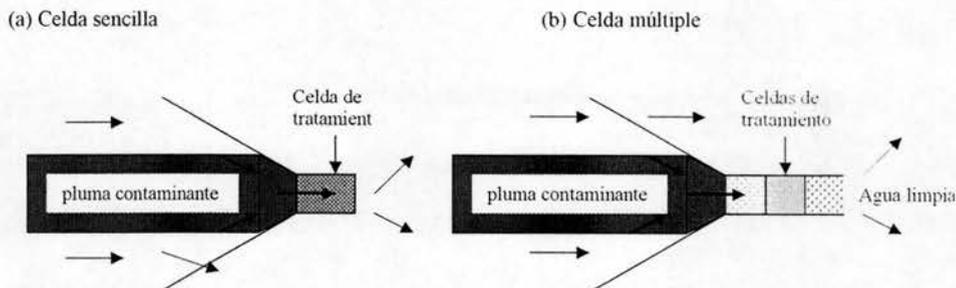
Los procesos químicos y físicos pueden usarse para promover tratamientos "in situ" para el agua subterránea contaminada. Los procesos químicos que pueden ser aplicados in situ son limitados debido al rango de las condiciones ambientales que afectan las reacciones químicas (temperatura y presi3n) son relativamente pequeñas; el rango de las temperaturas del agua subterránea es de alrededor de 10 y 15 °C. El agua subterránea debe estar bien mezclada con los reactivos, lo cual es difícil de llevar a cabo en un acuífero debido al gran tamaño de las plumas contaminantes en el agua subterránea. La permeabilidad relativamente baja del suelo y la heterogeneidad de los acuíferos. Bajo algunas condiciones, el tratamiento "in situ" es posible, particularmente en situaciones donde el agua subterránea contaminada puede rastrearse hasta un punto colector antes de su tratamiento y donde esta agua contaminada debe mezclarse con agentes de tratamiento.

Los procesos químicos que pueden aplicarse "in situ" incluyen: adsorci3n, precipitaci3n, dehalogenaci3n, oxidaci3n/reducci3n, fijaci3n y transformaci3n física. Estos procesos son promovidos por:

- (1) instalaci3n de una barrera de reacci3n permeable (trinchera de reacci3n o barrera reactiva in situ o barrera selectiva) en el acuífero para intersectar el agua contaminada y promover un ambiente controlado para la reacci3n; o
- (2) por la aplicaci3n de reactivos directamente al agua a trav3s de pozos o por infiltraci3n desde la superficie. La barrera puede ser construida empleando las t3cnicas descritas y rellenarse con reactivos como carb3n activado, piedra pómez o limaduras de hierro (Focht, et al. 1996), para prever el tratamiento deseado al agua subterránea.

Una variaci3n de la barrera de reacci3n permeable es la barrera de reacci3n de compuerta y t3nel. **Figura 4.12.** Este esquema utiliza pozos de barrera (los t3neles) para rastrear el agua subterránea hasta la porci3n reactiva permeable de la barrera (la puerta) y minimiza la longitud de la barrera sujeta a mantenimiento o reacondicionamiento hasta que los sitios de reacci3n en la barrera se agoten. La clasificaci3n de las tecnologías de tratamiento que pueden usarse para las barreras de reacci3n permeable se mencionan en la **Tabla 4.15.** Las primeras ventajas de las barreras de reacci3n permeable son el resultado de la naturaleza pasiva de esa tecnología: no hay necesidad de una fuente de poder, la cual representa el mayor costo de operaci3n y mantenimiento a largo plazo en los sistemas activos de remediaci3n.

Figura 4.12 Sistemas de configuraci3n de compuerta y t3nel.





(c) Celda múltiple

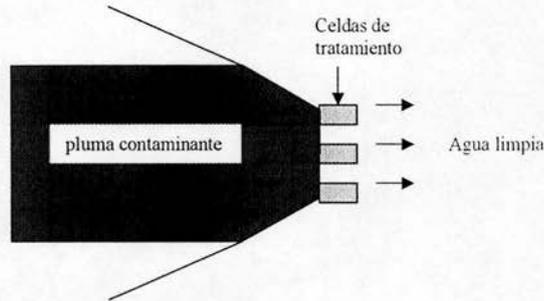


TABLA 4.15 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO APLICADAS EN BARRERAS PERMEABLES DE REACCIÓN

Tratamiento Medio	Contaminantes Atacados	Condición Prevaliente de la Tecnología
Hierro de valencia cero	Halocarbonos	Aplicada Comercialmente
Hierro de valencia cero	Metales reducibles (Cr ⁺⁶ , U)	Demostración en campo
Calizas	Metales, aguas ácidas	En práctica (minería)
Agentes de Precipitación (yeso, hidróxidos)	Metales	Estudios de laboratorio
Agentes de Sorción (Hidróxido de Hierro, GAC*, cal, hulla)	Metales y Orgánicos	Demostración en campo y/o estudios de laboratorio
Agentes Reductores (compuestos orgánicos, sulfuro de hidrógeno)	Metales reducibles	Demostración en campo
Pares Metálicos**	Halocarbonos	Estudios de laboratorio
Aceptores Biológicos de Electrones (ORC***, fuentes de oxígeno, nitratos)	BTEX	Experimentos en campo

* GAC = carbón activado granulado.

** Oxidación acoplada del metal y reducción del halocarbono con producción de cloruro y Fe⁺² en solución.

*** ORC = liberación de compuestos de oxígeno.



• PLANTEAMIENTOS INNOVADORES DE TRATAMIENTOS "IN SITU".

Un gran número de técnicas innovadoras para la remedación "in situ" de agua subterránea se han desarrollado en años recientes que deben proporcionar gran duración, alta eficiencia en la eliminación de contaminantes o un bajo costo de remedación para algunos casos de contaminación en aguas subterráneas.

• **REMEDIACIÓN INTRÍNSECA.** La remedación intrínseca (atenuación natural) implica la evaluación y monitoreo de los procesos que ocurren naturalmente e impide la migración de los contaminantes a receptores. La remedación intrínseca es usada para describir la biodegradación de contaminantes mediante microbios de origen natural; sin embargo, otros procesos naturales físicos o químicos (adsorción) pueden impedir la migración de contaminantes. En estos planteamientos, se permite actuar a las fuerzas naturales sobre el agua subterránea contaminada, sin intervención humana, hasta remediar el agua subterránea. Debido a que los microbios están presentes en casi todos los acuíferos y de que ocurren otros procesos naturales (sorción, complexación, precipitación, etc.) mitiga la contaminación, y estos procesos que ocurren naturalmente tienen un impacto beneficioso en la calidad del agua subterránea. La remedación intrínseca puede ser usada sola o para completar técnicas de remedación convencionales. Una fuente de contaminantes debe eliminarse previa a la remedación intrínseca para reducir la carga de contaminantes en el acuífero y por ello mejorar la eficiencia de la remedación intrínseca.

• **FITOREMEDIACIÓN.** Se refiere al uso planeado de plantas verdes para remover o contener contaminantes en el agua subterránea o en el suelo (Schnoor, et al., 1995). Las plantas remedian la contaminación mediante:

- (1) adsorción y acumulación en los tejidos de las plantas.
- (2) estimulación en la biodegradación; y
- (3) incremento de mineralización en la interfase suelo-raíz por hongos y microbios.

La fitoremediación se adapta mejor a sitios donde:

- (1) el agua subterránea contaminada es somera (menos de 5m de profundidad).
- (2) los contaminantes son moderadamente hidrófobos, clorinados o contienen amoníaco nitrotolueno.
- (3) exista exceso de nutrientes (nitratos, fosfatos, etc.) en el subsuelo.

• **EXTRACCIÓN POR ASPIRACIÓN DE VAPOR.** Esta técnica (USEPA, 1995b) extrae los contaminantes del agua subterránea circulando el agua extraída en el pozo de extracción, lo cual volatiliza los VOCs del agua subterránea. Los vapores son extraídos desde el pozo y tratados; el agua subterránea tratada es reinyectada dentro del acuífero y recirculada en la zona tratada del acuífero. Esta técnica ha demostrado su eficiencia en estudios piloto de tratamiento en acuíferos contaminados con DNAPL y LNAPL.

• **TRATAMIENTO POR HUMEDALES PARA AGUA SUBTERRÁNEA CONTAMINADA CON METALES.** En este planteamiento, el agua subterránea contaminada es llevada directo a un humedal, donde el agua se filtra verticalmente y fuera de él. Esta técnica fue desarrollada para usarse en el tratamiento de drenajes de las minas con un pH bajo y alto contenido de metales. El proceso aprovecha el hecho de que el humedal contiene tanto una zona aeróbica y una zona anaeróbica, las cuales ofrecen diferentes oportunidades para eliminar los contaminantes del agua subterránea. En tanto el agua que entra al humedal escurre verticalmente, la materia de la planta filtra y adsorbe algunos metales disueltos. Las reacciones de oxidación y precipitación ocurren en la zona aeróbica para eliminar metales e hidróxidos y los metales sulfurosos se producen por reducción de reacciones en la zona anaeróbica (McCoy et al., 1992).

• **DESCONTAMINACIÓN ELECTROQUÍMICA.** En este planteamiento, se colocan electrodos con cargas opuestas en el suelo y se induce carga, provocando la electrólisis en el agua subterránea. En tanto que los iones del agua hidrolizada (iones de H^+ y OH^-) migran hacia el electrodo con carga opuesta, los iones de H^+ crean un frente de agua ácida, que acelera la desorción de los contaminantes que son adsorbidos por el suelo. El proceso resulta en una extracción de metales del suelo, incluyendo los suelos de grano fino, considerando que el suelo tiene una capacidad suficiente de amortiguación (McCoy et al., 1992).



* **CONVECCIÓN INDUCIDA DE DENSIDAD (CID).** La CID se diseña para eliminar hidrocarburos del petróleo por medio del suministro de oxígeno para promover los procesos de biodegradación que ocurren en el suelo. El aire se inyecta en el fondo de un pozo común; el agua aireada brota del pozo y fluye hacia el acuífero, donde el agua rica en oxígeno incrementa la biodegradación natural. Simultáneamente, el agua fluye en el fondo, completando una corriente de convección alrededor del pozo.

Este sistema puede usarse junto con el sistema de vapor tratamiento/extracción siempre que no se encuentre contaminantes no biodegradables. Se espera que esta tecnología sea aplicable tanto en suelos de grano fino como de grano grueso y que tenga también un mayor grado de influencia que los pozos tradicionales de inyección de aire (Schrauf, 1996).

- **TRATAMIENTO "EX SITU".**
- **PROCESOS BIOLÓGICOS.**

Los procesos biológicos "ex situ" consisten en el tratamiento del agua subterránea extraída en contenedores hasta que la concentración de contaminantes este debajo de niveles predefinidos. Los procesos usados para tratar aguas residuales municipales son aplicables para el tratamiento de aguas subterráneas excepto en circunstancias donde el contaminante en el agua subterránea es tóxico para los microbios en el sistema de tratamiento biológico. Los procesos de tratamientos biológicos "ex situ" incluyen bioreactor y tratamiento con inyección de fase, entre otros.

* **BIOREACTORES.** En este planteamiento, los contaminantes se degradan poniéndolos en contacto con microbios en un medio donde se promueve el crecimiento biológico. Esto puede efectuarse usando sistemas de crecimiento suspendido (todos activados) o fijos (filtros aspersiones o contactores biológicos rotativos). La población microbiana puede derivarse del agua subterránea contaminada o adicionarse al sistema.

* **TRATAMIENTO DE FASE INYECTADA.** En esta propuesta, el agua subterránea extraída se mezcla con suelo y nutrientes y se agita constantemente en un medio ambiente controlado para promover la biodegradación de los contaminantes. El inoculo se coloca en un área definida y se deja hasta el que grado de biodegradación se obtenga. Finalmente, el inoculo es desecado, y entonces el agua y el suelo se disponen como desechos no peligrosos. Este proceso ofrece mucho mejor control de las variables involucradas que la variante del bioreactor pero es lento y requiere de una gran área para implementarse.

- **PROCESOS DE VOLATILIZACIÓN.**

Estos procesos son eficientes para tratar agua subterránea que es contaminada con químicos orgánicos que tienen una alta presión de vapor (Tabla 4.11). Los procesos de volatilización pueden ser eficientes también para eliminar contaminantes inorgánicos que tengan presión de vapor relativamente alta (por ejemplo, mercurio). Los procesos de volatilización o inyección de aire implican mezcla de agua subterránea contaminada con aire para permitir a los contaminantes volátiles que están disueltos en el agua subterránea se disocian de la fase disuelta y pasen a la fase de vapor, permitiendo su remoción del agua. La eficiencia de los procesos de volatilización depende del número de contactos aire/agua. Los contactos aire/agua pueden ser optimizados usando las técnicas de aereación por aerosol, aereación mediante aire difundido, aereadores de discos rotatorios. La principal ventaja de los planteamientos de volatilización "ex situ" sobre la volatilización "in situ" es la flexibilidad de los sistemas "ex situ" y su alta eficiencia.

- **PROCESOS QUÍMICOS Y FÍSICOS.**

Están disponibles los procesos químicos y físicos para tratamientos "ex situ" de casi todos los tipos de contaminantes presentes en el agua subterránea. Las técnicas de tratamiento químicas y físicas "ex situ" tienen las siguientes ventajas sobre las técnicas de tratamiento "in situ":

- (1) la capacidad para mantener la uniformidad del influente usando dispositivos de homogenización en la entrada del agua al sistema de tratamiento;



- (2) la capacidad para evaluar fácilmente la eficiencia del proceso de tratamiento monitoreando la calidad del agua subterránea tratada; y
- (3) la facilidad para adaptar los componentes del sistema de tratamiento en respuesta a los cambios de la calidad del influente para optimizar la eficiencia de tratamiento del agua subterránea. Algunas tecnologías de tratamiento físico y químico se identifican y ejemplifican en la **Tabla 4.16**

TABLA 4.16 RESUMEN DE TECNOLOGÍAS "EX SITU" PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Tecnología de Tratamiento para el Agua Subterránea	Ejemplos Representativos	Residuales	Estado de la Tecnología
Contaminantes Orgánicos			
Inyección de Aire	Torres empacadas, superficie de aireación difusa, remoción de compuestos volátiles, venteo de suelo	Aire con Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs)	Comercial
Fase Líquida	Carbón Activado Granulado (GAC) eliminación de un amplio espectro de VOCs	GAC para regeneración o evacuación	Comercial
Inyección de Vapor	Torres empacadas con inyección de vapor, remoción de compuestos volátiles	Solventes recuperados	Algo comercial
Membranas	Ultrafiltración para la eliminación de orgánicos seleccionados	Salmuera concentrada a un costo de la corriente	Comercial
Oxidación	Ozono/UV o Ozono/H ₂ O ₂ eliminación de orgánicos clorinados	Ninguna	Algo comercial en etapas de desarrollo
Lodos Activados	Eliminación/Destrucción de orgánicos degradables por oxígeno u oxidaciones de aire biológico	Lodo	Comercial
Reactores biológicos	Lecho fluidizado, para la oxidación de los orgánicos menos degradables	Lodo	Comercial
Biofísica	Carbón en polvo con lodos activados, tratamiento de aguas residuales de alta resistencia	Carbón en polvo y bacterias	Comercial



Contaminantes Inorgánicos

Precipitación Alcalina	Eliminación de metales pesados	Lodo peligroso	Comercial
Coagulación	Para eliminar metales pesados Sulfato Férrico o Aluminio	Lodo peligroso	Comercial
Intercambio Iónico	Metales pesados, Nitrato	Regeneración de corriente	Comercial
Adsorción	Eliminación de Selenio con alúmina activada	Regeneración de corriente	Comercial
Filtración	Eliminación de arcillas, otras partículas	Retrolavado de desechos	Comercial
Reducción	Con Dióxido de Azufre (SO ₂) reducción de Cr (VI)	Lodo	Comercial
Membranas	Ósmosis Inversa, ultrafiltración para eliminación de metales	Desecho líquido concentrado	Comercial, nuevas membranas están en desarrollo
Oxidación	Fe (II) y Mn (II)	Lodo	Comercial

TÉCNICAS DE TRATAMIENTO "EX SITU" MÁS USADAS PARA TRATAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA SON DESCRITAS A CONTINUACIÓN.

* **ADSORCIÓN POR CARBÓN.** Para este planteamiento, el agua subterránea es bombeada a una serie de cisternas que contienen carbón activado, por el cual los contaminantes del agua subterránea son adsorbidos. Debido a que el carbón activado ofrece sitios para la adsorción de carbonos orgánicos (debido a la semejanza entre los átomos de carbono en las moléculas del contaminante y los carbonos en el carbón activado) esta es una técnica eficiente para eliminar Compuestos Orgánicos Volátiles del agua subterránea. Periódicamente, el carbón activado debe reemplazarse o regenerarse debido a que los sitios de adsorción se saturan de Compuestos Orgánicos Volátiles.

* **INTERCAMBIO IÓNICO.** El intercambio iónico es similar a la adsorción, aunque la adsorción es causada por enlaces coordinados (enlaces por fuerzas de Van der Waals) de los metales a superficies específicas, aunque el intercambio iónico resulta del intercambio de iones (iones metálicos) por medio de fuerzas electrostáticas. El intercambio iónico ha sido usado para la remoción de metales disueltos. Esta técnica se implementa haciendo pasar el agua subterránea contaminada a través de un tanque de reacción que contiene resinas que tienen sitios de reacción que atraen a los contaminantes. Como en la adsorción por carbón las resinas utilizadas para el intercambio iónico deben ser reemplazadas o regeneradas cuando los sitios de reacción se han saturado con los contaminantes.

* **PRECIPITACIÓN.** La precipitación ocurre cuando existe un componente de concentración en el agua subterránea que es mayor que el límite de su solubilidad. La solubilidad es función de muchos factores, incluyendo pH, temperatura y la presencia de otros compuestos disueltos. La precipitación de compuestos clave se provoca manipulando estos factores para cambiar el equilibrio en la dirección que promueva la precipitación de ese compuesto. El compuesto menos soluble a un pH dado se precipita de la solución. La precipitación también puede ocurrir "in situ" en respuesta a los cambios en la química del agua subterránea. Debido a que la solubilidad es afectada por muchos factores, los cambios en la calidad del agua subterránea puede causar cambios en la solubilidad de los compuestos. La precipitación y la disolución pueden ser reacciones lentas, dependiendo de la solubilidad de los compuestos; después de ocurrir un cambio en la



química del agua subterránea que incremente la solubilidad del compuesto (extracción directa de agua subterránea de un acuífero teniendo un pH bajo). los minerales precipitados previamente requieren un largo periodo para disolverse nuevamente y ser removidos del acuífero.

* **ÓSMOSIS INVERSA.** En la ósmosis inversa los sólidos se separan del agua creando un gradiente de concentración a través de una membrana semipermeable (membrana que es permeable a los sólidos elegidos, con base en el tamaño de la molécula. Para prevenir que el agua también pase a través de la membrana, se aplica un gradiente de presión al lado opuesto de la membrana que exceda la presión osmótica. Esta tecnología es eficiente en eliminar sólidos disueltos del agua subterránea, pero su costo es elevado.



CAPÍTULO V. EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN CASO DE REMEDIACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA.

5.1 EVALUACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA DEL CASO DE REMEDIACIÓN.

Después de revisar un diseño, se sugiere hacer los cambios necesarios antes de iniciar la construcción. El objetivo del sistema es remover benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX) del agua subterránea. El costo proyectado del sistema original para una duración de 20 años fue de US \$19.124.000. Después de hacer los cambios, el costo proyectado disminuyó a US \$7.563.000. La parte sorprendente del ahorro es que se redujeron los costos de inversión en solo US \$1.686.000. El resto del ahorro resultó de los cambios en la operación y mantenimiento realizados al sistema original de tratamiento. Los cambios en el diseño sugeridos resultan en un ahorro de US \$9.875.000 en costos de operación y mantenimiento sobre la vida del proyecto. Se ha dicho que se puede diseñar un sistema de tratamiento de US \$20.000.000. Todo lo que se tiene que hacer es seleccionar todas las tecnologías de tratamiento que remuevan los compuestos encontrados en el agua subterránea y tratarlos es serie. Una lección importante para aprender de este proyecto es que ningún sistema de tratamiento es malo. Ambos sistemas; el sistema de tratamiento originalmente propuesto y el nuevo sistema de tratamiento, pueden eliminar los BTEX y alcanzar los criterios regulatorios. Ambos hubieran remediado en sitio. La única diferencia es que el diseño de un sistema cuesta US \$11.561.000 menos que el otro.

EL SITIO CONTAMINADO.

El sitio era una terminal de almacenamiento de petróleo localizada al norte de Florida. Una zona residencial se ubica al norte del sitio junto a un río y complejos industriales pequeños. El acuífero superficial fue impactado por derrames fortuitos de productos provenientes de la interconexión de los ductos y de los tanques. En las cercanías algunos pozos de irrigación fueron impactados y posteriormente abandonados. Durante los últimos 7 años no han ocurrido derrames adicionales. Desde 1986 se han llevado a cabo estudios del suelo y del agua subterránea. El sitio está conformado por un acuífero no confinado de arena y un acuífero semiconfinado de caliza, separados por una capa de arcilla que funciona como un acuitardo.

EL SISTEMA DE TRATAMIENTO ORIGINALMENTE PROPUESTO.

El sistema de tratamiento propuesto se muestra en la **Figura 5.1**. Consiste en un tanque de igualación de flujo; dos inyectores de aire en serie; carbón fase vapor para la salida de gas de los inyectores de aire; dos filtros de arena operados en paralelo y 2 unidades de carbón activado en serie. Su costo se presenta en la **Tabla 5.1**, incluyendo cada unidad, los pozos de recuperación, tuberías, preparación del sitio, instalación del equipo, energía eléctrica, licencias, ingeniería y administración del proyecto. El costo total del sistema original es de US \$4.357.000 incluyendo un 20% de imprevistos. El costo de operación para el sistema se resume en la **Tabla 5.2**. Este costo incluye energía, limpieza de los inyectores de aire, muestreo y análisis del sistema de tratamiento y pozos de monitoreo, mantenimiento de equipo, repuestos de carbón fase líquida y fase aire y gastos del operador. El costo anual de operación del sistema original es de US \$1.129.000 incluyendo un 20 % de imprevisto. El sistema puede acumular toda el agua subterránea contaminada, eliminar los contaminantes y descargar agua limpia. El sitio puede limpiarse en 20 años. Todos los requisitos gubernamentales son cumplidos y la salud humana y la seguridad son salvaguardados durante todo el proyecto.



Figura 5.1 Sistema de tratamiento originalmente propuesto.

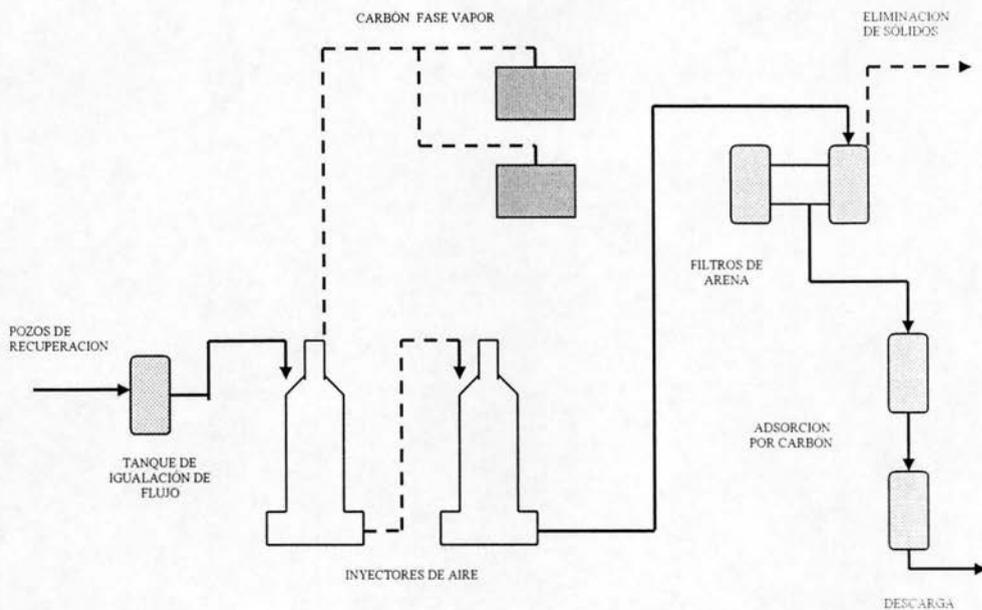


TABLA 5.1. SISTEMA DE TRATAMIENTO ORIGINALMENTE PROPUESTO

COSTO DEL EQUIPO	
Pozos de recuperación y tubería	US \$ 446,000
Dos inyectores de aire	280,000
Sistema de tratamiento con aire	190,000
Filtros de Arena	220,000
Adsorción por Carbón	140,000
Sistemas de extracción por vapor	190,000
Preparación e instalación del sitio	1,020,000
Energía eléctrica	411,000
Administración del proyecto, ingeniería, permisos	734,000
Imprevistos, 20%	726,000
TOTAL	US \$ 4,357,000



TABLA 5.2. SISTEMA DE TRATAMIENTO ORIGINALMENTE PROPUESTO

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO POR AÑO	
Energía	US \$ 121,000
Limpieza de los inyectores de aire	18,000
Muestreo y análisis del sistema de tratamiento	49,000
Muestreo y análisis de los pozos	522,000
Mantenimiento	36,000
Carbón-Fase líquida	55,000
Carbón-Fase aire	34,000
Operador	106,000
Imprevistos, 20%	188,000
TOTAL	US \$ 1,129,000

NUEVO SISTEMA DE TRATAMIENTO.

El primer paso después de aceptar el proyecto es analizar la estrategia. Muchas de las decisiones de diseño que se toman para un sistema de tratamiento se basan en suposiciones hechas durante la investigación del sitio.

Después de la revisión, se decidió que la información era insuficiente para plantear la ubicación de los pozos de recuperación y de monitoreo. Originalmente, se especificó un sistema de tratamiento de 300 gpm, con base en una prueba corta de bombeo y datos de una prueba de barrenación. El sistema de tratamiento es complejo y diseñado conservadoramente. Con base en los ahorros potenciales en el costo se sugirió elaborar actividades adicionales para refinar el diseño. Estas incluían:

- llevar a cabo dos pruebas de larga duración del desempeño del acuífero.
- obtener datos actualizados de la calidad del agua para desarrollar modificaciones al diseño original.
- construir un modelo tridimensional (3-D) con los datos actualizados de las características hidráulicas determinadas por las pruebas del desempeño del acuífero.
- desarrollar modificaciones al diseño del sistema de recuperación y tratamiento.

El modelo en 3-D mostró que la pluma de contaminación podría capturarse con menos pozos de recuperación y que la remediación podría monitorearse con menos pozos. Además el modelo permite pronosticar las concentraciones de BTEX que puedan esperarse en el sistema de tratamiento durante la vida del proyecto. Con base en esta información se redujo el número de pozos de recuperación de 14 a 6 y el flujo en el sistema de tratamiento de 300 gpm a 145 gpm. También se demostró que las concentraciones de BTEX son suficientemente bajas una vez que todos los pozos fueran bombeados. Para revisar el sistema de tratamiento la **Figura 5.2** resume la unidad de operación. El sistema incluye: un tanque de aireación, un filtro de arena continuo, un inyector de aire y un sistema de recarga. El sistema de pre-tratamiento de hierro se incluye en el análisis de costo, pero no se instale hasta que el difusor de aire haya operado durante un tiempo. Se analizó si es menos costosa la limpieza periódica del difusor de aire o si se debe pre-tratar para eliminar el hierro durante esta operación. Los datos del agua subterránea y del modelo nos permiten dar información suficiente para formar esta decisión antes de la construcción y operación. El sistema de tratamiento se construye de tal manera que esta unidad de operación pueda agregarse en cualquier momento. El costo para el nuevo sistema de tratamiento se resume en la **Tabla 5.3**. El mismo costo que se incluyó en el sistema de tratamiento original se incluyó en este sistema con la adición de los costos por modelación. La inversión es de US \$2,671,000. Los costos de operación se resumen en la **Tabla 5.4**. Los costos son los mismos que aquellos para el sistema original de tratamiento con dos categorías eliminadas. **Primero** el nuevo sistema de tratamiento no requiere carbón activado para la corriente de aire o de agua, así que los costos por reposición del carbón no se incluyeron. **Segundo**, el hierro en la forma de sólidos suspendidos, se envía a la planta de tratamiento pública (POTW) para su disposición, no habrá BTEX provenientes del retrolavado continuo del



filtro de arena. Los costos anuales de operación para el nuevo sistema de tratamiento son de US \$374,000 incluyendo un 20% de imprevistos.

Figura 5.2 Nuevo sistema de tratamiento.

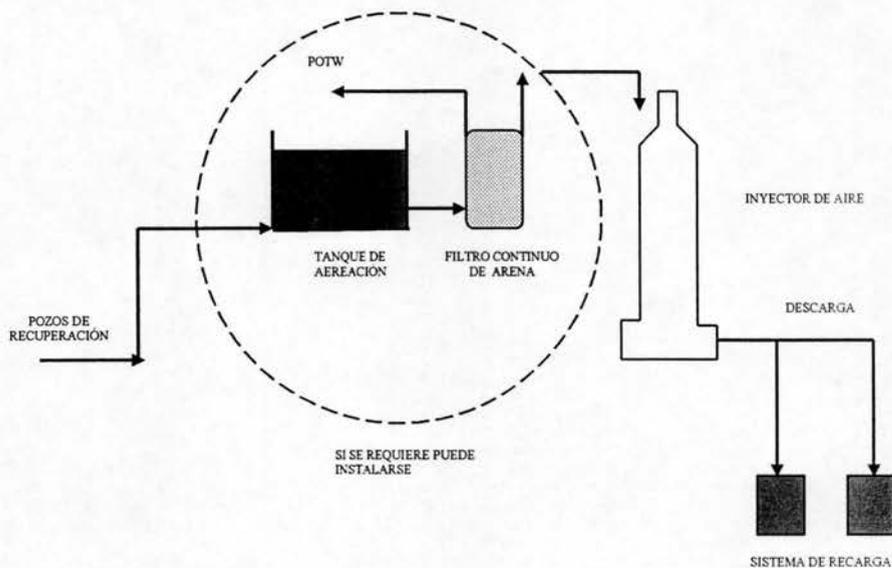


TABLA 5.3. NUEVO SISTEMA DE TRATAMIENTO

COSTO DEL EQUIPO

Pozos de recuperación y tuberías	US \$ 258,000
Inyector de aire	91,000
Tanque de aeración	70,000
Filtros continuos de arena	140,000
Preparación e instalación del sitio	357,000
Energía eléctrica	110,000
Administración del proyecto, ingeniería, permisos, modelos	1,200,000
Imprevistos, 20%	445,000
TOTAL	US \$ 2,671,000

**TABLA 5.4. NUEVO SISTEMA DE TRATAMIENTO**

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO POR AÑO	
Energía	US \$ 42,000
Limpieza de los inyectoros de aire	15,000
Muestreo y análisis del sistema de tratamiento	24,000
Muestreo y análisis de los pozos	83,000
Mantenimiento	24,000
Descarga de los filtros de arena a la planta de tratamiento pública	33,000
Operador	91,000
Imprevistos, 20%	62,000
TOTAL	US \$ 374,000

COMPARACIÓN DEL DISEÑO DE LOS DOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO.

En la **Tabla 5.5** se resume el costo total del diseño de ambos sistemas de tratamiento. La comparación directa de los costos se basó en valor presente **Tabla 5.5**. Para calcular los costos de operación de la **Tabla 5.5**, se tomó el costo anual de operación de las **Tablas 5.2 y 5.4** y se calculó el valor presente con base en una vida útil de 20 años del proyecto y 5% del valor del dinero. El ahorro total usando el nuevo diseño es de US \$11,561,000. Los principales ahorros provinieron de los cambios de operación resultantes del nuevo diseño. Más del 85% de los ahorros provinieron de los cambios de operación y mantenimiento. La principal disminución en la operación y mantenimiento se debe a tres cambios:

- (1) el número de pozos de monitoreo y sus frecuencias de muestreo fueron disminuidos
- (2) el repuesto de carbón se eliminó, y
- (3) el sistema completo se hizo más pequeño y más simple, permitiendo una reducción de consumo de energía, en los recursos humanos y en el mantenimiento.

Este caso demuestra que nada se obtiene con el hecho de inyectar dinero a un problema. Todos los componentes deben considerarse cuando se diseña un sistema de remediación. Es importante tener conocimiento total del agua subterránea y de la naturaleza de la contaminación. Incluir a alguien con experiencia cuando se diseña el sistema de tratamiento, trae como consecuencia no requerir equipamiento adicional. Finalmente, analizar el capital y el costo de operación del sistema de tratamiento sobre la vida completa del proyecto. Los costos de operación y mantenimiento pueden ser factores críticos en el análisis económico del sistema de tratamiento.

TABLA 5.5. COSTO TOTAL DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

	INVERSIÓN (US \$)	OPERACIÓN ^a (US \$)	TOTAL (US \$)
Sistema de tratamiento originalmente propuesto	4,357,000	14,767,000	19,124,000
Nuevo sistemas de tratamiento	2,671,000	4,892,000	7,563,000

^a Valor presente: 20 años al 5%



CASO DE ESTUDIO:
REMEDIACIÓN DE ACUÍFERO
EN MÉXICO



CASO DE ESTUDIO EN MÉXICO.

Se trata de una Planta que se dedica a la producción de partes automotrices de plástico para vehículos automotores, ubicada en la Ciudad de Monterrey, Nuevo León, la cual tiene instalada una estación de autoconsumo de gasolina y diesel en la que se encuentran instalados dos tanques, uno de 20,000 litros de capacidad para almacenamiento de gasolina y otro de 5,000 litros de capacidad para el almacenamiento de diesel, ambos tanques se encuentran equipados con doble contención e instalados bajo tierra en una bóveda rellena de arena. Durante las rutinas de inspección al área de almacenamiento, se detectó fuga en una de las mangueras que alimentan al surtidor de gasolina, por lo que de inmediato se procedió a reparar el daño en la manguera y dejar fuera de servicio a dicho tanque para evaluar la magnitud del problema ecológico, que, en su caso, hubiera. La anterior medida sirvió para determinar, el volumen de gasolina fugado. Dicha Planta se adhirió al programa de Auditorías Ambientales de la SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). En la visita realizada en sus oficinas corporativas, se concluyó en la necesidad de contar con los servicios de un consultor externo especialista en evaluaciones de suelo, acuíferos y medidas de remediación. Se procedió a contratar a la firma Enrix-Selbach para la realización de estas evaluaciones. La evaluación se definió en las siguientes etapas:

- 1) Investigación y Evaluación del Sitio;
- 2) Establecer el Plan de Remediación seleccionando los métodos mas apropiados según sea el caso; y
- 3) Implementación de las medidas de Remediación.

La etapa 1 tuvo los siguientes objetivos:

- Determinar las condiciones hidrogeológicas del sitio.
- Identificar las áreas de los impactos potenciales en suelos y acuíferos.

La etapa 2 tuvo el objetivo de:

- Establecer un plan de Remediación para los acuíferos y/o suelo que hubieran sido impactados por la fuga del material.

La etapa 3 tuvo el objetivo de:

- Implantar las medidas de Remediación más apropiadas para lograr la restauración del sitio.

Para lograr estos objetivos, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Construcción de 6 pozos de monitoreo de agua subterránea de aproximadamente 15 metros de profundidad, en los alrededores de la estación de autoconsumo de gasolina.
- Tomas de muestras de suelo y agua para análisis de los siguientes compuestos: **Benceno**, **Tolueno**, **Etilbenceno** y **Xileno** (BTEX) por los métodos 5030/8260 de la USEPA (Agencia de Protección al Ambiente de los E.U.) La toma de muestras y análisis fueron realizados por el laboratorio Grupo Microanálisis.
- Con el resultado de los análisis se estará en posibilidad de determinar los impactos potenciales a las zonas que hubieren resultado afectadas, para proceder a seleccionar los métodos de remediación mismos que fueron comunicados a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).



LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SITIO.

La Planta esta ubicada en la Ciudad de Monterrey, Nuevo León y se dedica a la producción de partes automotrices de plástico para vehículos automotores. Las instalaciones ocupan una superficie total de 483,300.00 m² y tiene una superficie construida de 48,348.50 m².

El clima corresponde al tipo semiseco muy cálido y cálido, con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 22 a 24 °C; la temperatura mínima registrada en invierno es de 2 °C bajo cero, y en verano de 42°C.

Los vientos dominantes provienen del Oeste y Sureste con una velocidad de 5.1 Km/hr. En invierno predominan los vientos del Norte que se agudizan en Enero y Febrero.

La precipitación media anual es de 600 a 700 mm. La frecuencia de heladas es de 0-20 días.

Los niveles del manto freático se encuentran a una profundidad de 12 metros y dirección de las corrientes es Noroeste-Sureste.

La topografía del sitio es consistente con sus alrededores. El área de estudio se localiza a una altitud de 400 metros sobre el nivel del mar.

El suelo en el área de estudio es arcilla limosa y caliches café claro conglomerado de calizas y lutita calcárea gris. El perfil litológico es predominantemente de textura fina, así como de arcilla limosa y calcárea de color café claro para un primer estrato y conglomerado de grava de caliza de color gris fuertemente cementado para el segundo estrato su espesor varía desde los 50 cm hasta los 5 metros, y un tercer estrato compuesto en alternancia de lutitas calcáreas y caliza arcillosa, el espesor es de aproximadamente 800 metros.

La permeabilidad del suelo es de tipo secundario por fracturas, el uso del suelo es de carácter industrial ya que pertenece a un Parque Industrial.

DESCRIPCIÓN DE DAÑOS.

La Planta cuenta con una estación de autoconsumo la cual fue construida entre Mayo y Septiembre de 1994 y puesta en operación en Septiembre de 1995, la cual abastece a sus unidades pool y montacargas. Esta estación de autoconsumo cuenta con dos tanques uno de gasolina de 20,000 litros y uno de diesel de 5,000 litros. Los tanques son de acero-fibra de vidrio de doble pared, los tanques son independientes y cada uno de ellos contiene una motobomba, las líneas de producto son de doble pared. En Septiembre de 1999 se realizaron pruebas de hermeticidad a dichos tanques, mediante el Método TEI/ULLAGE SYSTEM (volumétrico computarizado 100%, complementado con un sistema acústico). Estas pruebas fueron realizadas por la empresa "ALLWASTE TANK SERVICES" que cuenta con acreditación del Sistema Nacional de Laboratorios de Prueba (SINALP) No. MM-130-085/97 y con la certificación de PEMEX No. ST-118 de 1994. Los resultados de estas pruebas de hermeticidad indican que los tanques, líneas y mangueras cumplen con la prueba de hermeticidad como lo demuestra el certificado otorgado el 2 de Septiembre de 1999.

A finales de Enero del 2000 se notifica a Ingeniería de la Planta el faltante de aproximadamente 29 m³ de gasolina por parte del personal de inventarios de la planta, el cual fue detectado a mediados de Diciembre de 1999, durante este tiempo se realizaron las siguientes acciones para determinar la causa del faltante:

- Desarrollo de balances de entradas y salidas del material.
- Comprobación de entregas de material por parte del proveedor a través de mediciones.
- Investigación para identificar la posibilidad de despachos no autorizados del material.
- Revisión del programa computarizado de inventarios.

Una vez terminadas las acciones anteriores, sin haberse encontrado la causa de la diferencia de inventarios, se decidió realizar una inspección física a la instalación del tanque de autoconsumo, encontrándose una manguera que alimenta al surtidor de gasolina agrietada debido a la fatiga del material. Derivado del hallazgo anterior se realizaron las siguientes acciones:

1. Al ser identificada la fuga en la manguera del tanque, este fue puesto de inmediato fuera de operación, y se acordonó el área para restringir el acceso y reducir el riesgo.
2. Se reemplazo la manguera.



3. La gasolina del tanque fue transferida a un tanque superficial y el tanque subterráneo fue llenado con agua, se practicaron pruebas de hermeticidad mediante el Método TEI/ULLAGE SYSTEM (volumétrico computarizado 100% complementado con un sistema acústico), realizadas por la compañía "ALLWASTE TANK SERVICES" que cuenta con acreditación del Sistema Nacional de Laboratorios de Prueba (SINALP) No. MM-130-085/97 y con la certificación de PEMEX No. ST-118 de 1994. Como resultado de estas pruebas, no se detectaron fugas en el tanque, válvulas y tuberías asociadas.
4. Como medida preventiva a la visita de los expertos de las oficinas corporativas, se realizaron 4 perforaciones en la parte exterior de la bóveda subterránea y otras 4 en la parte interna de la bóveda para detectar presencia del material en el suelo enviándose muestras del mismo al laboratorio para su análisis. En los pozos de servicio Nos. 2 y 3, se detectó olor a gasolina. En ese momento se sospecha de una posible afectación en el suelo y en el agua de los pozos. La Planta cuenta con 3 pozos de abastecimiento, 2 de ellos en operación y uno que nunca se ha operado. El pozo E-1 se encuentra al lado suroeste de la estación de autoconsumo de combustibles y a una distancia de 117.44 metros; el pozo E-2 se encuentra del lado noreste y a una distancia de 96.02 metros y finalmente el pozo E-3 que se encuentra fuera de operación, se encuentra del lado suroeste a una distancia de 200.35 metros.

ESTRATEGIA PARA LA DETERMINACIÓN DE DAÑOS.

Dadas las condiciones de la fuga y considerando que el material (gasolina) se infiltró hacia el subsuelo a través de fracturas naturales que presenta el terreno, es difícil cuantificar y cualificar los posibles daños de manera inmediata. Por lo que fue necesario establecer un plan de muestreo en el área circundante al tanque de gasolina para determinar la movilidad del material. Este plan consistió en establecer una serie de muestreos en puntos estratégicos seleccionados a partir de la topografía e hidrología del terreno, el plan de muestreo se determinó para cumplir con los siguientes objetivos:

1. Determinar los niveles de contaminación (área, profundidad y concentración de contaminantes) en el suelo.
2. Identificar la localización del material libre (gasolina).
3. Identificar el posible impacto y extensión en los cuerpos de agua subterránea.
4. Evaluar el riesgo a la salud humana así como al ambiente.

DISEÑO DEL MUESTREO.

Con base a los datos topográficos e hidrológicos se determinaron los puntos de muestreo, y considerando que la pendiente del terreno (aguas abajo) está orientada en dirección noroeste-sureste de el área del evento, se decidió realizar 10 pozos de muestreo en las áreas cercanas a la estación de autoconsumo y a los pozos de abastecimiento de acuerdo al plano.

De estos pozos de monitoreo fueron tomadas muestras del suelo y agua, en las muestras de suelo se determinó el contenido de TPH's (Hidrocarburos Totales del Petróleo) y BTEX, sin embargo las características del terreno primordialmente compuesto de roca y que el material difícilmente se impregna en el suelo se decidió tomar muestras solamente de agua analizando el contenido de BTEX, al ser estos los compuestos solubles en agua. Las muestras de agua fueron analizadas siguiendo el método EPA 5030 purga y trampa y EPA 8260, cromatografía de gases, acoplado al espectrómetro de masas, dichas muestras fueron analizadas por el laboratorio del Grupo Microanálisis con registro SINALP No.Q-089-068198. Los puntos de muestreo, la distancia y profundidad de los mismos con respecto a la fuente del derrame se ilustran en la **Tabla 1:**



TABLA 1 DISTANCIA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO CON RESPECTO A LA FUENTE

Punto de muestreo	Distancia a la Fuente (m)	Profundidad (m)
E-1	117.4	ND
E-2	96.02	ND
E-3	200.35	ND
PM-1	5.00	15
PM-2	32.37	14.75
PM-3	270.37	15
PM-4	96.25	15
PM-5	68.38	12
PM-6	85.30	15

E = Pozo de abastecimiento
 PM = Pozo de muestreo
 ND = No disponible

Durante el desarrollo y preparación de los pozos de monitoreo no fue detectada la presencia del material en fase libre, por lo que se decidió tomar muestras de agua en los primeros 6 pozos de monitoreo, dichas muestras fueron tomadas el 23-Febrero-2000 y enviadas a analizar por el laboratorio del Grupo Microanálisis. También fueron enviadas muestras de agua de los 3 pozos de abastecimiento y la cisterna que almacena el agua proveniente de los pozos. Cada muestra tomada se identificó con una etiqueta y se sellaron, la identificación de la muestra contenía la siguiente información:

- Número de pozo y profundidad a la cual fue tomada la muestra.
- Localización del punto de muestreo.
- Fecha del muestreo.
- Hora, en la cual se realizó el muestreo.
- Nombre del responsable de efectuar el muestreo.
- Análisis solicitado.
- Observaciones.

La **Tabla 2** muestra los resultados obtenidos de los análisis practicados a 12 muestras tomadas.

TABLA 2 RESULTADOS DE LABORATORIO

Fecha	Identificación	Benceno (mg/l)	Tolueno (mg/l)	Etilbenceno (mg/l)	Xileno (mg/l)
17-02-00	P1	0.0018	0.0049	ND	ND
17-02-00	P2	0.3683	0.4789	ND	0.3168
17-02-00	P3	21.87	36.46	5.89	21.76
17-02-00	Cisterna	0.2118	0.2002	ND	0.0673
23-02-00	PM-1	0.0199	0.136	ND	0.0294
23-02-00	PM-2	ND	ND	ND	ND
23-02-00	PM-3	1.88	0.3146	ND	0.5516
23-02-00	PM-4	1.178	2.095	0.115	1.484
23-02-00	PM-5	ND	ND	ND	ND
23-02-00	PM-6	ND	ND	ND	ND

ND = NO DETECTADO



Con los resultados obtenidos se determinó la ubicación de los siguientes 4 pozos (PM-7-PM-10), siendo el identificado como PM-7 el propuesto por PROFEPA. Durante los trabajos de construcción del PM-9 se detectó la presencia de material en fase libre por lo que se habilitó este pozo para la extracción del material.

Secuencia de eventos que propiciaron el incidente y de la emergencia.

No.	Fecha	Evento
1	02-09-1999	Se realizan pruebas de hermeticidad al tanque y tuberías de gasolina, la prueba indica que no hay fugas.
2	11-11-1999	Se termina de realizar mantenimiento civil a la estación de gasolina, quedando todo en buenas condiciones de operación.
3	15-12-1999	Se identifican diferencias en los inventarios de consumo de gasolina.
4	26-01-2000	Se sospecha fuga del tanque de gasolina y se procede el vaciar el tanque. Se identifica la fuente de la fuga localizándose en la entrada hombre del tanque, se clausura la operación del tanque y se acordona el área.
5	27-01-2000	Se revisa la manguera del surtidor de gasolina del tanque y se detecta que la manguera tiene un agrietamiento. Se termina de vaciar el tanque de gasolina transfiriendo el material hacia un carro tanque.
6	28-01-2000	Se lleva acabo una prueba de hermeticidad siendo esta satisfactoria.

Secuencia de toma de decisiones durante la emergencia.

No.	Fecha	Evento
1	26-01-2000	Se procede el vaciar el tanque para eliminar fugas del material. Se clausura la operación del tanque y se acordona el área.
2	27-01-2000	Se habilita un tanque superficial de 1030 litros para el suministro de gasolina. Se acordona el área del tanque. Se transfiere la totalidad del material hacia un carro tanque.
3	28-01-2000	Se lleva acabo una prueba de hermeticidad al tanque siendo esta satisfactoria.
4	11-02-2000	Se revisan propuestas para estudio y remediación de suelos.
5	14-02-2000	Se define plan de trabajo para determinar la afectación por el material fugado.
6	16-02-2000	Se inician los trabajos de perforación para toma de muestras.
7	23-02-2000	Se toman muestras de los puntos de muestreo.
8	29-02-2000	Se analizan los resultados.
9	29-02-2000	Continúan los trabajos de perforación.



INVESTIGACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

En la Planta existen dos pozos de servicio de agua, E-1 y E-2, que están bombeando activamente. El pozo E-3 nunca ha sido operado, no cuenta con equipo de bombeo, y el ademe aparenta estar bloqueado aproximadamente a 10 metros de profundidad.

Para la segunda semana de Marzo, se habían instalado 12 pozos de monitoreo en la Planta. Actualmente dos de los pozos, el PM-9 y el PM-11, contienen material en fase libre (MFL). Inicialmente se instaló un grupo de seis pozos de monitoreo, los cuales se desarrollaron removiendo un mínimo de 10 veces el volumen de agua contenido en cada pozo, y se levantaron topográficamente referenciándolos a un punto de cota conocida en la Planta. Las bombas de los pozos de servicio de la Planta se apagaron y se permitió que los pozos de monitoreo se recuperaran. Se midieron las elevaciones del agua subterránea en los pozos de monitoreo y se delineó una primera superficie piezométrica para el área **Figura 1**. La dirección del flujo subterráneo es hacia el sureste y el gradiente es de 0.00625 m/m.

La revisión de estos resultados analíticos **Tabla 2** indica que la extensión de agua subterránea afectada por la gasolina se ha localizado al sureste del área del Tanque de Almacenamiento Subterráneo. Aunque se detectaron concentraciones de BTEX en el PM-4, ubicado al noreste del Tanque de Almacenamiento Subterráneo (TAS) se estima que estas concentraciones están influenciadas por la acción del pozo de servicio E-2. Ya que el gradiente normal de aguas subterráneas es hacia el sureste, no se espera que las concentraciones de BTEX detectadas en el PM-4 se extiendan una distancia significativa más allá del mismo. No se detectó presencia de BTEX en los pozos de monitoreo PM-5 y PM-6, ubicados al oeste y gradiente arriba del Tanque de Almacenamiento Subterráneo (TAS).

Durante la investigación del agua encontrada en el pozo E-3 se detectaron cantidades medibles de Material Fase Libre (MFL). Este MFL se comparó visualmente con gasolina sin plomo, proveniente del mismo vendedor, y se encontró que son similares en color y apariencia. Con el fin de determinar si la fuente de este MFL era la gasolina sin plomo del TAS, se instalaron los pozos de monitoreo adicionales PM-8, PM-9, y PM-10, aguas arriba del E-3. Un pozo de monitoreo adicional, el PM-7, se instaló aproximadamente 265 metros al este de la fosa del TAS, en una ubicación recomendada por la PROFEPA.

Luego de instalar el pozo de monitoreo PM-9 se examinó el agua subterránea y se identificó MFL en este pozo. Ya que dicho pozo está situado aguas arriba del pozo E-3 y gradiente abajo del TAS, lo que confirma que el MFL identificado en los pozos de monitoreo PM-9 y E-3 provienen de la gasolina sin plomo liberada del tanque.

Con el fin de identificar la extensión de MFL, se instaló el pozo de monitoreo PM-11 aguas abajo del pozo de agua E-3, entre éste y el pozo de monitoreo PM-3. Luego de la instalación del pozo de monitoreo PM-11 se examinó el agua subterránea y se identificó MFL. Esto indica que el MFL aparenta extenderse desde el PM-9 hasta el PM-11, sin alcanzar el pozo de monitoreo PM-3.

La posible migración de MFL bajo los edificios de la Planta situados al sur de los pozos de monitoreo PM-8 y PM-9 se determinó con la instalación del pozo de monitoreo PM-12. No se identificó evidencia de MFL durante la perforación o luego de la instalación y desarrollo del pozo de monitoreo PM-12.

Una vez instalados los pozos de monitoreo del PM-7 al PM-11, éstos se desarrollaron por medio de la remoción de un mínimo de 10 volúmenes de agua de cada pozo. Las muestras de agua fueron recolectadas para analizar la presencia de BTEX. Los resultados analíticos de estas muestras se presentan en la **Tabla 3**.



Figura 1. Isolinias piezométricas, Pozos de monitoreo, Pozos de recuperación y Pozos de servicio existentes.

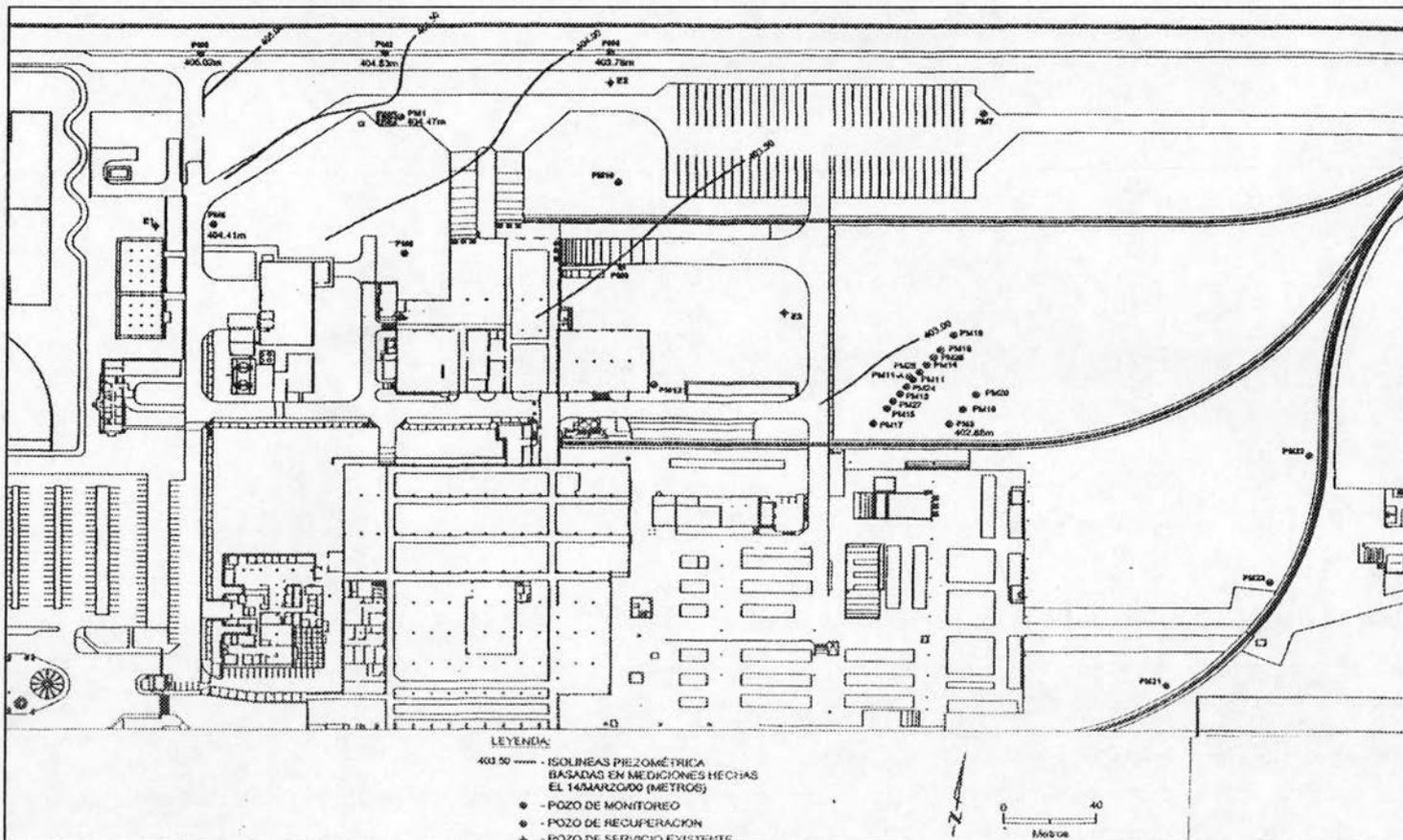




TABLA 3 RESULTADOS ANALÍTICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA COLECTADAS EN LOS POZOS DE MONITOREO PM-7 A PM-11 EL 9/03/2000

Pozo de Monitoreo	Benceno (mg/l)	Tolueno (mg/l)	Etilbenceno (mg/l)	Xileno (mg/l)
PM-7	ND	ND	ND	ND
PM-8	ND	ND	ND	ND
PM-9	PRESENTÓ MATERIAL EN FASE LIBRE			
PM-10	2.105	0.842	0.032	1.320
PM-11	22.55	46.63	4.51	12.08

ND: NO DETECTADO

Se instaló además una línea de pozos de monitoreo de 2" de diámetro, unos 100 metros gradiente abajo del PM-3. Mediante estos pozos (PM-21, PM-22 y PM-23) se estableció la calidad del agua subterránea que está próxima a salir del área Figura 1.

DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE LIMPIEZA.

Con el fin de evaluar los métodos posibles de remediación para el área afectada, lo primero en definir fueron los parámetros de limpieza. Como resultado de las conversaciones con representantes de PROFEPA y CNA, los parámetros de limpieza para aguas subterráneas a ser aplicados en la Planta fueron identificados como los "Niveles Protectores de Limpieza" (PCLs) para aguas subterráneas industriales, identificados en las Reglas del Programa de Reducción de Riesgos de Texas (Texas Risk Reduction Program-TRRP) desarrolladas por la Comisión de Conservación de Recursos Naturales de Texas (Texas National Resource Conservation Comisión-TNRCC). Las reglas TRRP proveen un proceso jerarquizado para establecer los PCLs de sustancias químicas de interés (Chemicals of Concern-COCs). Las reglas TRRP establecen tablas de búsqueda de Nivel 1 para escenarios del uso de suelo comercial-industrial, que combinan información actual de toxicidad y valores físico-químicos de parámetros COCs con factores de exposición estándar para determinar las concentraciones de COCs en el medio ambiente y la salud humana, incluyendo subgrupos sensibles a lo largo de su vida. Los COCs identificados actualmente en el sitio son Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno. Esta lista de COCs fue depurada luego de la instalación de los sistemas de remediación y monitoreo de aguas subterráneas.

Estos compuestos (BTEX) conforman un porcentaje significativo de los subproductos del petróleo, y en la gasolina representan el mayor grupo de compuestos orgánicos que tienen efecto sobre la salud. Además los BTEX son el grupo principal de compuestos orgánicos solubles típicamente encontrados en el suelo y en el agua subterránea. Los BTEX tienen algunos efectos tóxicos agudos y de largo plazo y el Benceno es conocido como un compuesto carcinogénico. Los niveles de acción típicos para Benceno son más restrictivos que los de otros compuestos; así, al cumplir con los Niveles Máximos establecidos para el Benceno, también se esta cumpliendo con los niveles de acción de otros compuestos.

En el Nivel 1 de las reglas TRRP, se identificó un rango de PCLs para los COCs: Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno. Este rango se basa en el uso de las aguas subterráneas y el tipo de acuífero en el sitio. La **Tabla 4** presenta PCLs para ingestión de aguas subterráneas ($^{GW}GW_{ing}$) y para un acuífero clase 3 ($^{GW}GW_{Clase 3}$). El acuífero Clase 3 es definido como aquél cuya agua no puede ser utilizada para consumo humano. El agua extraída en la Planta no se utiliza para beber y no existe intención futura de utilizar este acuífero para suministro de agua potable. Por lo anterior, se determinó que los PCLs para un acuífero Clase 3 ($^{GW}GW_{Clase 3}$) pueden ser apropiados para el sitio. Estos PCLs se presentan en la **Tabla 4**.



TABLA 4 NIVELES PROTECTORES DE LIMPIEZA PARA UN ACUÍFERO CLASE 3 NO DESTINADO AL CONSUMO HUMANO

Sustancia Química de Interés (COC)	PCL Comercial/Industrial ^{GW} GW _{Clase 3} (mg/L)
Benceno	0.5
Tolueno	100
Etilbenceno	70
Xileno	1,000

Además de cumplir con los niveles PCL para acuífero Clase 3 dentro de las instalaciones, se estima que pueden requerirse valores más restrictivos fuera de los límites de la propiedad. Estos valores han sido identificados tentativamente con los valores para fuentes de abastecimiento de agua para uso público urbano establecidos en la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua. La **Tabla 5**, presenta los valores de limpieza para fuentes de abastecimiento de agua para uso público urbano.

Si se considera que el acuífero sea de uso agrícola, se podrían utilizar los mismos límites considerados para el uso público urbano, debido a la posibilidad de que exista contacto humano e ingestión.

TABLA 5 NIVELES PROTECTORES DE LIMPIEZA ESTABLECIDOS POR LA LEY FEDERAL DE DERECHOS EN MATERIA DE AGUA 2003 PARA FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA USO PÚBLICO URBANO

Sustancia Química de Interés (COC)	Valor límite para fuentes de abastecimiento de agua para uso público urbano (mg/L)
Benceno	0.01
Etilbenceno	0.3
Tolueno	0.7
Xileno	No determinado

NOTA: SE PROPONE UTILIZAR EL PCL DE 10 MG/L PARA XILENO, IDENTIFICADO EN LAS TABLAS DE NIVEL 1 DE LAS REGLAS TRRP PARA ZONAS RESIDENCIALES (⁷⁷GW₂₀₀₃).

Es posible que las aguas subterráneas en los alrededores de las instalaciones no tengan una adecuada calidad para beber y que el acuífero sea identificado Clase 3. Si este es el caso, los valores de limpieza a ser logrados en los límites de la propiedad pueden ser reajustados para reflejar que el uso de las aguas subterráneas no incluye el consumo humano.

CONSIDERACIONES ADICIONALES DE REMEDIACIÓN.

Además de cumplir con los PCLs, se identificaron varios aspectos a ser considerados durante la evaluación de los métodos de remediación. Estos aspectos se utilizaron luego para determinar los métodos potenciales de remediación, y son los siguientes:

- El MFL presente en las aguas subterráneas de los pozos de monitoreo PM-9 y PM-11 y en el pozo de servicio E-3 indican que el MFL se está moviendo. El método de remediación seleccionado para la instalación debe ser identificado e implementado rápidamente con el fin de capturar el MFL y minimizar movimiento futuro de migración.
- El método de remediación debe ser capaz de remover la pluma de MFL y eliminar una futura fuente potencial de sustancias químicas de interés (COC) de fase disuelta.



- En vista de la naturaleza expedita del proyecto, los parámetros específicos del acuífero no se lograron determinar. Por lo tanto, el método de remediación debe tener la capacidad de ser diseñado e implementado efectivamente con un mínimo de parámetros específicos del sitio.
- Existen limitaciones de permisos en las instalaciones. De acuerdo al permiso actual de aguas, la empresa sólo puede explotar anualmente 200,000 m³ de agua, y este volumen puede ser excedido una vez que el sistema de remediación esté completamente instalado.

Mientras que la porción en fase disuelta es un aspecto a ser considerado, el producto en fase libre representa una fuente continua de sustancias químicas de interés para la fase disuelta. En consecuencia, al remover el MFL, la fuente potencial de los componentes de fase disuelta será eliminada. Por esta razón, los métodos de remediación que se evaluaron inicialmente consideran la captura y tratamiento del MFL, para luego tratar lo referente a los compuestos en fase disuelta.

MÉTODOS POTENCIALES DE REMEDIACIÓN.

Varios métodos de remediación han probado ser efectivos en la remediación de aguas subterráneas afectadas por gasolina. Estos métodos son los siguientes:

- Recuperación de Material en Fase Libre (MFL)
- Sistemas de Recuperación y Tratamiento de Aguas Subterráneas
- Barreras Subterráneas
- Aereación-Extracción de Vapores del Suelo
- Atenuación Natural

RECUPERACIÓN DE MATERIAL EN FASE LIBRE.

Cuando se determina su presencia, la remoción de MFL puede ser lograda en forma bastante exitosa. En áreas que contengan fases de más de 10 cm de espesor de MFL, se pueden utilizar bombas hidrofóbicas para su remoción, las cuales toman selectivamente el MFL de la superficie de las aguas subterráneas, mientras el agua permanece en su sitio.

Este método requiere un mínimo tratamiento o disposición de agua subterránea. Sin embargo, no resuelve el problema del agua subterránea afectada por gasolina. Adicionalmente, el nivel freático no es abatido y por lo tanto sólo se removerá el MFL en las adyacencias inmediatas de la bomba hidrofóbica. Esta tecnología ha sido implementada provisionalmente mientras se instala un sistema de remediación más completo y puede que sea utilizada como parte del diseño final del sistema de tratamiento.

RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA.

Existen varios sistemas de recuperación y tratamiento de aguas subterráneas disponibles; sin embargo, para el caso de esta Planta se evaluó el bombeo con bombas de carga superior, un tratamiento inicial con un separador agua/aceite, seguido por un tratamiento con columnas de separación. El bombeo activo con una bomba de carga superior remueve tanto el MFL como el agua subterránea asociada. Este método trabaja bajando el nivel freático y, por lo tanto, captura activamente el MFL y las sustancias químicas de interés (COCs) en fase disuelta en las aguas subterráneas dentro del radio de bombeo del pozo.

Este método puede requerir un volumen muy grande de agua a ser extraído del acuífero asociado. Hasta la fecha no se han realizado pruebas de bombeo formales para establecer la tasa óptima de extracción de agua subterránea. Sin embargo, teniendo en cuenta la información preliminar obtenida durante la instalación de los pozos de recuperación, se planea que el agua tratada sea utilizada en la Planta para satisfacer parte de la demanda de agua para procesos.



BARRERAS SUBTERRÁNEAS.

Las barreras subterráneas incluyen trincheras de recuperación de aguas subterráneas, y paredes o desvíos de baja permeabilidad, tales como paredes de lechada instaladas bajo tierra para contener, capturar o dirigir el flujo de aguas subterráneas en las adyacencias de un sitio. Estas paredes pueden ser instaladas tanto aguas arriba del área afectada para desviar el flujo de aguas subterráneas del área, como aguas abajo del área afectada para reducir la cantidad de aguas subterráneas afectadas que escapan del sitio. Las paredes pueden ser utilizadas en conjunto con un sistema recolector para extraer las aguas subterráneas afectadas por gasolina y el MFL.

Aunque pudiera ser efectivo, este tipo de sistema sería muy difícil de instalar debido a la profundidad de las aguas subterráneas, y a la dureza y cementación del subsuelo. Conversaciones iniciales con un contratista de construcción indicaron que tomaría por lo menos 2 meses el excavar una trinchera hasta el nivel de las aguas subterráneas. Esto resultaría en un retraso inaceptable para el inicio del tratamiento del agua subterránea y permitiría que el MFL se siga moviendo. Por lo tanto, esta tecnología no es apropiada para las condiciones de la Planta.

AERACIÓN-EXTRACCIÓN DE SUELO POR VAPOR.

Esta alternativa involucra la instalación de pozos de aireación en las adyacencias de las aguas subterráneas afectadas por gasolina para volatilizar las sustancias químicas de interés (COC) en fase disuelta en las aguas subterráneas y el MFL. También requiere la instalación de pozos de extracción de vapor para capturar el producto volatilizado y removerlo de los espacios porosos de la zona vadosa. El sistema de Aireación/Extracción de Vapor (A/EV) es un tratamiento de aguas subterráneas en sitio que ha probado ser muy efectivo en la remoción de compuestos orgánicos volátiles tales como los BTEX en agua subterránea. Esta tecnología es muy efectiva en sitios con arenas de grano medio a grueso. Cuando es diseñado de forma adecuada y situado en un escenario geológico apropiado, puede ser una barrera efectiva para evitar la migración de producto de fase disuelta fuera del sitio.

La evaluación inicial de la geología del sitio sugiere que este método no es aplicable debido a las características de litología fracturada y confinamiento del acuífero. Por lo tanto, esta tecnología no es considerada apropiada para las condiciones del terreno.

ATENUACIÓN NATURAL.

Esta alternativa considera el monitoreo de la atenuación natural o reducción de las concentraciones de sustancias químicas de interés (COCs) a medida que son transportados. La atenuación es resultado de procesos de dilución, difusión, y consumo por bacterias presentes de manera natural en el acuífero. La dilución ocurre cuando un sistema de recuperación de agua subterránea remueve el agua afectada que contiene las mayores concentraciones de COCs y el agua subterránea limpia atraída hacia el sistema reduce la concentración en el agua subterránea que no es removida. La difusión es el proceso natural mediante el cual los COCs en soluciones más concentradas (representadas en este caso por el agua subterránea afectada por la gasolina) se movilizan hacia áreas de menor concentración para establecer un equilibrio dentro del medio (en este caso, todo el acuífero). La reducción en la concentración de los COCs también ocurre cuando las bacterias nativas utilizan el hidrocarburo en fase disuelta como fuente de alimentación para crecer y reproducirse. Muchos estudios muestran que este tipo de bacterias están presentes en todas las formaciones subterráneas. En presencia de otros nutrientes esenciales, las bacterias se adaptan y se multiplican rápidamente, consumiendo el hidrocarburo disuelto.

Esta tecnología es ampliamente aceptada en los Estados Unidos de América. Los tres procesos están ocurriendo actualmente en la Planta. El monitoreo sistemático permitirá establecer la efectividad de este sistema de remedación. La presencia de nutrientes será monitoreada y podrá ser suplementada para optimizar el crecimiento bacteriano, lo que resultaría en la reducción del hidrocarburo disuelto. La Atenuación Natural formará parte de la tecnología a ser utilizada en la Planta.

Luego de la evaluación de los métodos de remedación potenciales arriba indicados, se determinó que el sistema de recuperación y tratamiento de aguas subterráneas, combinado con atenuación natural sería el sistema más efectivo para lograr los niveles PCLs identificados.



DETALLES DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

La consultoría ENTRIX recomienda instalar una línea de pozos de recuperación para remover el MFL de la superficie del agua subterránea. Ya que la línea de pozos no tiene la continuidad del sistema de trincheras, deben crearse zonas de captura en cada pozo de recuperación para remover tanto el MFL como el producto en fase disuelta que migra entre los pozos. Esto no se puede lograr con sólo desnatar el MFL en la superficie del agua subterránea. Para que la línea de pozos sea efectiva, la remoción de agua subterránea debe ser suficiente para atraer el MFL hacia el sistema de pozos desde todas direcciones. Si la línea de pozos es instalada cerca de la zona donde se ubica el TAS, resultará que el producto quede localizado gradiente abajo de la línea de pozos. La recuperación de agua subterránea en cantidad suficiente para transportar el MFL una distancia tan grande aguas arriba hasta la línea de pozos de recuperación no es probable en este sitio. Entrix recomienda instalar la línea de pozos en el borde más extremo de la pluma de MFL. El extremo de la pluma de MFL ha sido identificado como el área entre el pozo E-3 que contiene MFL, y el pozo de monitoreo aguas abajo más cercano PM-3 que no contiene MFL.

El sistema de bombeo y tratamiento consistirá en la remoción de agua subterránea y MFL de una línea de pozos de recuperación ubicada aproximadamente 30 metros aguas arriba del pozo de monitoreo PM-3. El primer conjunto de pozos de recuperación (PM-11A, y PM-13 al PM-18) ya ha sido instalado, con espaciamiento de 10 metros entre pozos, en una línea perpendicular al flujo del agua subterránea. Una segunda línea de pozos (PM-19 y PM-20) fue instalada, manteniendo el mismo espaciamiento entre pozos, perpendicular al flujo del agua subterránea y adyacente al pozo de monitoreo PM-3. Esta línea de pozos se utilizará para monitorear la efectividad de la remoción de MFL de la primera línea de pozos de recuperación y, además podrían ser utilizados como pozos de recuperación en caso de ser necesario. Luego de la instalación del primer conjunto de pozos de recuperación, se instalaron 4 pozos de recuperación adicionales (PM-24 a PM-27) adyacentes al pozo PM-11 que contiene producto en fase libre, y a los pozos PM-13 y PM-14. En total se instalaron 14 pozos de recuperación en ésta área para capturar el MFL en la lutita fracturada. En la **Figura 1**, se muestra la localización de los pozos de recuperación.

Los pozos de recuperación fueron instalados a una profundidad de 15 metros, en perforaciones de 12" (30.48 cm) de diámetro. Cada pozo de recuperación tiene tubería de PVC, con tramo ranurado desde los 6 metros hasta los 16 metros, con ranuras de 0.020" (0.051 cm). Desde la superficie del terreno y hasta los 6 metros, se colocó tubería lisa. El empaque de grava alrededor de la tubería ranurada consiste de arena de cuarzo lavada con un tamiz de tamaño 16/30. El empaque de arena fue ubicado aproximadamente entre las profundidades de 5.5 m a 15 m. Se colocaron astillas de bentonita sobre el empaque de arena desde los 2 m a 5.5 m de profundidad para sellar el empaque de arena y evitar el paso de agua superficial hacia la tubería ranurada; el espacio anular, entre 1 y 4.5 m de profundidad, fue sellado con lechada de cemento, el metro restante hasta superficie se dejó en terreno natural para poder instalar un registro sobre el pozo. En superficie, el pozo será protegido con un registro de acero (0.55 m x 0.55 m x 0.65 m de profundidad) a ras del suelo, que dará cabida al equipamiento del pozo. El pozo de recuperación PM-11 fue instalado con tubería de PVC de 4" (10.16 cm) y ranuras de 0.010" (0.025 cm), por ser el único material de construcción disponible al momento de su instalación.

La recuperación del agua subterránea se logrará instalando una serie de bombas sumergibles eléctricas y neumáticas en los pozos de recuperación para capturar el hidrocarburo en fase disuelta y el MFL. Las bombas sumergibles eléctricas serán utilizadas principalmente para reducir el nivel freático a lo largo de la línea de pozos de recuperación y establecer el control hidráulico del área. Estas bombas sumergibles serán instaladas cerca del fondo del pozo de recuperación para un máximo abatimiento y removerán agua subterránea a una tasa de 30 gpm (113.56 lpm). Las bombas también removerán del acuífero hidrocarburo en fase disuelta. Las bombas neumáticas serán de carga superior e irán instaladas cerca de la interfase agua subterránea-MFL; son bombas de recuperación total de fluido y removerán tanto hidrocarburo en fase disuelta como MFL. La ventaja de la bomba neumática es que puede bombear en seco sin que se dañe la bomba y es intrínsecamente segura de operar en presencia de gasolina. La tasa máxima de bombeo es de aproximadamente 5 gpm (18.925 lpm). Los pozos de recuperación serán monitoreados con regularidad y si se logra remover suficiente agua subterránea, y establecer un control hidráulico, utilizando las bombas neumáticas, las bombas eléctricas sumergibles serán puestas fuera de servicio.



La instalación inicial del sistema de bombeo y tratamiento consistirá en la colocación de bombas eléctricas sumergibles y bombas neumáticas en la línea de pozos de recuperación. Una vez establecidos los niveles del agua subterránea y las tasas de bombeo, se ajustará las tasas de bombeo para asegurar el atrape y recuperación del MFL. El agua subterránea recuperada será bombeada a un múltiple de PVC de 4" (10.16 cm) y transferida al sistema de tratamiento del agua.

El sistema de tratamiento de agua subterránea consistirá en la separación de las fases agua/producto y la remoción de material disuelto en el agua mediante una columna de separación de aire. Se podría instalar tanques de compensación para capturar sólidos y reducir el número de ciclos de la bomba, prolongando así la vida del equipo de tratamiento.

La instalación inicial de dos separadores agua/producto de 50 gpm (189.25 lpm) instalados en paralelo. El MFL será removido y las concentraciones de BTEX de la fase disuelta serán reducidas a 10 partes por millón (10 ppm). El MFL será eliminado por gravedad a un tanque de polipropileno y reciclado. El agua subterránea será alimentada por gravedad a la columna de aire diseñada para tratar 120 gpm (454.20 lpm). Con este diseño inicial, el sistema será capaz de reducir la concentración de Benceno en el afluente hasta 0.032 ppm. El agua subterránea tratada será transferida por una línea de agua de 6" (15.24 cm) a las cisternas de la Planta y utilizada como agua de proceso.

RESULTADOS DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN LOS POZOS DE MONITOREO, DE RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DE MATERIAL EN FASE DISUELTA

Identificación de la muestra	Fecha de muestreo	Benceno (mg/L)	Tolueno (mg/L)	Etilbenceno (mg/L)	Xileno (mg/L)
E-1	17-02-2000	0.0018	0.0049	ND	ND
	10-04-2000	ND	ND	ND	0.0004
E-2	17-02-2000	0.3683	0.4789	ND	0.3168
	10-04-2000	0.045	0.079	ND	0.1996
	05-05-2000	0.079	0.090	ND	0.047
E-3	17-02-2000	21.87	36.46	5.89	21.76
Cisterna	17-02-2000	0.2118	0.2002	ND	0.0673
	10-04-2000	ND	ND	ND	0.0009
	05-05-2000	ND	0.033	ND	0.17
PM-1	23-02-2000	0.0199	0.136	ND	0.0294
	11-04-2000	0.009	0.005	ND	0.0138
PM-2	23-02-2000	ND	ND	ND	ND
	10-04-2000	ND	ND	ND	0.0004
PM-3	23-02-2000	1.88	0.3146	ND	0.5516
	11-04-2000	4.396	3.36	0.606	4.8388
PM-4	23-02-2000	1.178	2.095	0.115	1.484
	11-04-2000	0.009	0.008	ND	0.0419
PM-5	23-02-2000	ND	ND	ND	ND
	10-04-2000	ND	ND	ND	0.0008
PM-6	23-02-2000	ND	ND	ND	ND
	10-04-2000	ND	ND	ND	0.0005
PM-7	09-03-2000	ND	ND	ND	ND
	10-04-2000	ND	ND	ND	0.0031



PM-8	09-03-2000 11-04-2000	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND
PM-9	09-03-2000	Producto	Libre		
PM-10	09-03-2000 10-04-2000	2.105 Producto	0.842 Libre	0.032	1.32
PM-11	09-03-2000 10-04-2000	22.55 producto	46.63 Libre	4.51	12.08
PM-20	10-04-2000	0.12	0.261	0.04	0.4505
PM-21	10-04-2000 19-04-2000 26-04-2000 05-05-2000 12-05-2000	0.349 2.75 1.95 3.373 3.35	0.041 0.32 0.21 0.168 0.07	ND ND ND ND ND	0.331 1.41 1.21 0.06 0.46
PM-22	10-04-2000 19-04-2000 26-04-2000 05-05-2000	ND ND ND ND	ND ND ND ND	ND ND ND ND	0.0008 ND ND ND
PM-23	10-04-2000 19-04-2000 26-04-2000 05-05-2000	0.012 0.04 0.01 ND	ND ND ND ND	ND ND ND ND	0.0682 0.06 ND ND
Entrada a la Columna de Separación (Air Stripper)	26-04-2000 05-05-2000	1.56 3.66	2.17 6.864	0.31 1.057	2.51 4.82
Salida de la Columna de Separación (Air Stripper)	26-04-2000 05-05-2000	ND ND	ND ND	ND ND	ND ND

ND = NO DETECTADO

En referencia a la identificación de la posible presencia de Metil Terbutil Eter (MTBE) en la cisterna, y en los pozos PM-2, PM-5, PM-6, PM34, PM-35, y PM-36, la **Tabla 6** muestra las concentraciones de MTBE de los meses de Junio, Julio, Octubre y Noviembre de 2000 y adicionalmente los pozos de monitoreo PM-21, PM-33 y de la entrada y salida de la columna de separación; para evaluar la eficiencia de remoción de este compuesto en el sistema de tratamiento y recuperación. Los resultados de esta serie de evaluaciones, muestran que las mayores concentraciones de los compuestos de interés se encuentran presentes en los pozos PM-21 y PM-33 los cuales se encuentran conectados de forma provisional al sistema de recuperación. Los resultados también muestran que el sistema de tratamiento además de tener una excelente remoción de BTEX, opera con la misma eficiencia para la remoción del MTBE.



TABLA 6 RESULTADOS DE LAS EVALUACIONES DE MTBE Y BTEX EN LOS POZOS DE MONITOREO

Identificación de la muestra	Fecha de muestreo	Benceno (mg/L)	Tolueno (mg/L)	Etilbenceno (mg/L)	Xileno (mg/L)	MTBE (mg/L)
PM-2	13-06-2000	ND	ND	ND	0.0042	ND
PM-5	13-06-2000	ND	ND	ND	ND	ND
PM-6	13-06-2000	ND	ND	ND	ND	ND
PM-21	13-06-2000	1.7392	0.0134	ND	0.0492	----
	23-06-2000	0.601	ND	ND	ND	11.348
	07-07-2000	0.427	ND	ND	ND	5.914
	24-10-2000	----	----	----	----	3.3540
	29-11-2000	----	----	----	----	1.7550
PM-33	13-06-2000	0.5045	0.0114	ND	0.1365	----
	07-07-2000	0.772	ND	ND	0.250	5.082
	24-10-2000	----	----	----	----	6.8650
	29-11-2000	----	----	----	----	0.9240
PM-34	13-06-2000	0.0089	ND	ND	0.0127	0.5356
	23-06-2000	ND	ND	ND	ND	0.716
	07-07-2000	ND	ND	ND	ND	0.481
	24-10-2000	----	----	----	----	0.4359
	29-11-2000	----	----	----	----	0.5536
PM-35	13-06-2000	0.2758	ND	ND	0.0332	1.0538
	23-06-2000	0.099	ND	ND	ND	1.675
	07-07-2000	0.028	ND	ND	ND	0.882
	24-10-2000	----	----	----	----	0.2285
	29-11-2000	----	----	----	----	0.0640
PM-36	13-06-2000	ND	ND	ND	ND	ND
Cisterna	24-10-2000	----	----	----	----	0.7432
	29-11-2000	----	----	----	----	0.1536
Entrada a la Columna de Separación (Air Stripper)	13-06-2000	1.9965	2.897	0.552	4.2695	7.137
	07-07-2000	1.197	1.103	ND	1.940	3.746
	24-10-2000	----	----	----	----	9.7930
	29-11-2000	----	----	----	----	3.4145
Salida de la Columna de Separación (Air Stripper)	13-06-2000	ND	ND	ND	ND	0.0066
	07-07-2000	ND	ND	ND	ND	0.018
	24-10-2000	----	----	----	----	0.8316
	29-11-2000	----	----	----	----	0.2558

Las actividades en el "Plan de Acciones Correctivas" durante el periodo del 27 de Junio al 18 de Agosto del 2000 fueron las siguientes:

Periodo: 27 de Junio al 14 de Julio del 2000:

- El día 27 de Junio, el pozo PM-12 fue equipado con una bomba eléctrica y conectado al sistema de recuperación y tratamiento. La Tabla 7 muestra la utilización actualizada de los pozos instalados en la Planta.



- El 29 de Junio, los pozos PM-21 y PM-33 fueron equipados con bombas. En el pozo PM-21 se instaló una bomba neumática y en el PM-33 se instaló una bomba eléctrica; ambos pozos fueron conectados al sistema de recuperación y tratamiento.
- El día 3 de Julio, los pozos PM-3 y PM-32 fueron equipados con bombas. En el pozo PM-3 se instaló una bomba neumática y en el PM-32 se instaló una bomba eléctrica; los pozos fueron conectados al sistema de recuperación y tratamiento.
- El día 7 de Julio se capturaron muestras de agua subterránea en los pozos PM-21, PM-33, PM-34, PM-35, en la cisterna y a la entrada y salida de la columna de separación, mismas que fueron enviadas al laboratorio para su análisis. En el caso de PM-33 se observa que el Tolueno y el Etilbenceno no fueron detectables, mientras que las concentraciones de Benceno y Xileno aumentaron levemente, pero manteniéndose en el mismo orden de magnitud. La diferencia observada en las concentraciones de BTEX entre las muestras de la entrada y la salida de la columna de separación indican que el sistema está operando eficientemente **Tabla 7A**.

Periodo: 15 de Julio al 27 de Julio del 2000:

- El día 21 de Julio fueron tomadas muestras en los pozos E-1, E-2, PM-21, PM-33, PM-34, PM-35, en la cisterna y a la entrada y salida de la columna de separación, mismas que fueron enviadas al laboratorio para su análisis. La **Tabla 8** muestra que las concentraciones de Benceno en los pozos PM-21, PM-33 y PM-35 y de Tolueno en el pozos PM-33 siguen disminuyendo. En el pozo de servicio E-1 y en la cisterna, los BTEX siguen resultando no detectables. En el pozo E-2 el Benceno disminuyó y la concentración de Tolueno presentó un leve aumento, pero manteniéndose ambos en el mismo orden de magnitud. La diferencia observada en las concentraciones de BTEX entre las muestras de la entrada y la salida de la columna de separación indican que este sistema está operando eficientemente.

Periodo: 28 de Julio al 20 de Noviembre del 2000:

- El día 4 de Agosto se capturaron muestras de agua subterránea en los pozos PM-21, PM-33, PM-34, PM-35, en la cisterna y a la entrada y salida de la columna de separación, mismas que fueron enviadas al laboratorio para su análisis. La **Tabla 9** muestra que las concentraciones de Benceno y Xileno siguen disminuyendo en el acuífero. En el pozo PM-33 la concentración de Xileno pasó a ser no detectable y en el pozo PM-35 la concentración de Benceno pasó también a ser no detectable. La diferencia observada en las concentraciones de BTEX entre las muestras de la entrada y la salida de la columna de separación, y la tendencia mantenida de disminución que se viene observando en las concentraciones de los compuestos analizados, indica que el sistema de recuperación y tratamiento instalado está funcionando eficientemente.
- Al 20 de Noviembre se habrán retirado aproximadamente 1567.4 litros de Material en Fase Libre (MFL) del acuífero; este volumen incluye el MFL recuperado en los separadores agua/producto y el recuperado manualmente en los pozos PM-10 y PM-11 **Tabla 10**.
- Entre los días 1 y 31 de Julio el sistema instalado en la Planta trató un promedio diario de 435 m³ de agua subterránea.



TABLA 7 CARACTERISTICAS DE LOS POZOS INSTALADOS EN LA PLANTA

Pozo	Uso	Bomba	Profundidad Total (m)	Diámetro de la Perforación (cm)
PM-1	Monitoreo	-----	15	10.8
PM-2	Monitoreo	-----	14.75	15.24
PM-3	Recuperación	Neumática	15	20.32
PM-4	Monitoreo	-----	15	10.8
PM-5	Monitoreo	-----	12	10.8
PM-6	Monitoreo	-----	15	10.8
PM-7	Monitoreo	-----	15	15.24
PM-8	Monitoreo	-----	15	15.24
PM-9	Recuperación	Neumática	15	15.24
PM-10	Monitoreo	-----	15	10.8
PM-11	Monitoreo	-----	15	20.32
PM-11A	Recuperación	Neumática	15.6	31.12
PM-12	Recuperación	Eléctrica	15	10.8
PM-13	Recuperación	Eléctrica	15.6	31.12
PM-14	Monitoreo	-----	15.6	31.12
PM-15	Recuperación	Neumática	15.6	31.12
PM-16	Monitoreo	-----	15.6	31.12
PM-17	Recuperación	Neumática	15.6	31.12
PM-18	Recuperación	Eléctrica	15.6	31.12
PM-19	Recuperación	Neumática	15.6	31.12
PM-20	Monitoreo	-----	15.6	31.12
PM-21	Recuperación	Neumática	15.6	31.12
PM-22	Monitoreo	-----	15	15.24
PM-23	Monitoreo	-----	15	15.24
PM-24	Recuperación	Neumática	15.6	31.12
PM-25	Recuperación	Neumática	15.6	31.12
PM-26	Recuperación	Neumática	15.6	31.12
PM-27	Recuperación	Neumática	15.6	31.12
PM-28	Recuperación	Neumática	20	31.12
PM-29	Recuperación	Eléctrica	21	31.12
PM-30	Recuperación	Eléctrica	25	31.12
PM-31	Monitoreo	-----	27	31.12
PM-32	Recuperación	Eléctrica	21	31.12
PM-33	Recuperación	Eléctrica	21	31.12



PM-34	Monitoreo	-----	18	31.12
PM-35	Monitoreo	-----	18	31.12
PM-36	Monitoreo	-----	18	31.12
E-3	Recuperación	Eléctrica	39	----

TABLA 7A RESULTADOS ANALITICOS DEL MUESTREO

Fecha del muestreo	Sitio de muestreo	Benceno (mg/L)	Tolueno (mg/L)	Etilbenceno (mg/L)	Xileno (mg/L)
07-07-2000	Cisterna	ND	ND	ND	ND
07-07-2000	PM-21	0.427	ND	ND	ND
07-07-2000	PM-33	0.772	ND	ND	0.250
07-07-2000	PM-34	ND	ND	ND	ND
07-07-2000	PM-35	0.028	ND	ND	ND
07-07-2000	Entrada a la Columna de Separación (Air Stripper)	1.197	1.103	ND	1.94
07-07-2000	Salida de la Columna de Separación (Air Stripper)	ND	ND	ND	ND

TABLA 8 RESULTADOS ANALITICOS DEL MUESTREO

Fecha del muestreo	Sitio de muestreo	Benceno (mg/L)	Tolueno (mg/L)	Etilbenceno (mg/L)	Xileno (mg/L)
21-07-2000	E-1	ND	ND	ND	ND
21-07-2000	E-2	0.014	0.035	ND	0.217
21-07-2000	Cisterna	ND	ND	ND	ND
21-07-2000	PM-21	0.355	ND	ND	ND
21-07-2000	PM-33	0.504	ND	ND	0.070
21-07-2000	PM-34	ND	ND	ND	ND
21-07-2000	PM-35	0.007	ND	ND	ND
	Entrada a la Columna de Separación (Air Stripper)	1.153	1.318	0.258	1.902
	Salida de la Columna de Separación (Air Stripper)	ND	ND	ND	0.033



TABLA 9 RESULTADOS ANALITICOS DEL MUESTREO

Fecha del muestreo	Sitio de muestreo	Benceno (mg/L)	Tolueno (mg/L)	Etilbenceno (mg/L)	Xileno (mg/L)
04-08-2000	Cisterna	ND	ND	ND	ND
04-08-2000	PM-21	0.054	ND	ND	ND
04-08-2000	PM-33	0.199	ND	ND	ND
04-08-2000	PM-34	ND	ND	ND	ND
04-08-2000	PM-35	ND	ND	ND	ND
04-08-2000	Entrada a la Columna de Separación (Air Stripper)	1.2775	1.5770	0.2100	1.6060
04-08-2000	Salida de la Columna de Separación (Air Stripper)	ND	ND	ND	ND

TABLA 10 MATERIAL EN FASE LIBRE REMOVIDO EN LA PLANTA

Material en Fase Libre (litros)			
Fecha	Manual	Separador Agua/Producto	Total
3-1-00			0.0
10-1-00			0.0
17-1-00			0.0
24-1-00			0.0
26-1-00	50		50
31-1-00			0.0
7-2-00	10		10
14-2-00	10		10
21-2-00	10		10
28-2-00	20		20
6-3-00	25		25
13-3-00	15		15
20-3-00	15		15
27-3-00	15		15
3-4-00	15		15
10-4-00	15		15
17-4-00		100	100



24-4-00		300	300
1-5-00		300	300
8-5-00		100	100
15-5-00		100	100
22-5-00		50	50
29-5-00		50	50
5-6-00		50	50
12-6-00		49	49
19-6-00		49	49
26-6-00	2	35	37
3-7-2000	1	28	29
10-7-00	1	21	22
17-7-00	1	21	22
24-7-00	1	21	22
31-7-00	1	14	15
7-8-00	0.5	7	7.5
14-8-00	0.2	3.5	3.7
21-8-00	0.2	3.5	3.7
28-8-00	0	1	1.0
4-9-00	0.5	3.5	4.0
11-9-00	8	3.5	11.5
18-9-00	1	3.5	4.5
25-9-00	1	3.5	4.5
2-10-00	1	3.5	4.5
9-10-00	1	3.5	4.5
16-10-00	1	3.5	4.5
23-10-00	1	3.5	4.5
30-10-00	1	2.5	3.5
6-11-00	1	2.5	3.5
13-11-00	1	2.5	3.5
20-11-00	1	2.5	3.5
TOTAL			1567.4



En reuniones sostenidas los días 14 de Noviembre de 2000 y 29 de Marzo de 2001, el personal de la Planta de autopartes propuso dos grupos de Límites de Limpieza, unos para ser aplicados dentro de la Planta y otros, más restrictivos, para ser aplicados fuera del límite de los terrenos propiedad de la Planta. Las concentraciones de BTEX presentadas en los Límites de Limpieza están tomados del programa de "Acción Correctiva con Base en el Riesgo" (Risk Based Corrective Action, RBCA) del estado de Idaho E.U. El 14 de Agosto de 2001, CNA establece que los Valores de Referencia Específicos, Clase 2, Nivel 2, de las Guías RBCA del estado de Idaho, propuestos como Límites de Limpieza, son aceptables para ser utilizados en la Planta.

Los Límites de Limpieza a ser utilizados dentro de la Planta son:

○ Benceno	0.617 mg/l
○ Tolueno	20.4 mg/l
○ Etilbenceno	10.2 mg/l
○ Xileno	198 mg/l

Los resultados de BTEX para todos los 40 puntos de muestreo (3 pozos de servicio y 37 pozos de recuperación o monitoreo) están por debajo de los Límites de Limpieza, como se muestra en los resultados de la **Tabla 11**.

Los Límites de Limpieza a ser utilizados fuera de los linderos de la Planta fueron:

○ Benceno	0.14 mg/l
○ Tolueno	10.4 mg/l
○ Etilbenceno	5.21 mg/l
○ Xileno	104 mg/l

Como se puede observar en los resultados de la **Tabla 11**, no se detectaron compuestos de BTEX en las muestras de agua subterránea captadas en los pozos externos ubicados aguas debajo de la Planta y localizados en el Parque Industrial la Silla, el Rancho 14 de Marzo y el Parque Industrial Pueblo Nuevo. Los pozos PM-34, PM-35 y PM-36, ubicados en el lindero suroeste de la Planta, en dirección gradiente abajo con respecto al flujo subterráneo, fueron evaluados utilizando estos Límites de Limpieza. Los resultados analíticos indican que las concentraciones de BTEX en los pozos de monitoreo PM-34, PM-35 y PM-36, están por debajo de los Límites de Limpieza aplicables a las áreas ubicadas fuera de la Planta durante los años 2001 y 2002.

POZOS DE RECUPERACIÓN Y SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA.

Se propuso continuar con la operación del sistema de recuperación de agua subterránea a una capacidad menor, tanto para satisfacer parte del volumen de agua de proceso requerido en la Planta, como para permitir el monitoreo continuado de la calidad del agua subterránea en el área. Los pozos escogidos para lograr los objetivos antes mencionados fueron: E-3, PM-3, PM-9, PM-11A, PM-12, PM-13, PM-17, PM-20, PM-24 y PM-27. El bombeo de estos pozos pudo haber sido modificado en la medida en que cambiará la demanda de agua en la Planta. Los pozos de recuperación restantes PM-14 al 16, PM-18, PM-19, PM-21, PM-25, PM-26, PM-28, PM-29, PM-30, PM-32 y PM-33 fueron desactivados pero se mantuvieron listos para entrar en operación durante al menos un año, en caso de que un cambio de condiciones hiciera necesario reiniciar su bombeo.

Antes de que ocurriera la fuga de gasolina, el agua para proceso (no potable) era extraída de otros pozos de servicio instalados en la Planta (E-1 y E-2) en un acuífero ubicado a mayor profundidad (aproximadamente 30 m); por lo tanto el bombeo de los 10 pozos arriba mencionados, los cuales están ubicados en el acuífero más somero, disminuyeron el uso de los pozos de servicio E-1 y E-2 y aseguraron el suministro de agua de buena calidad para la Planta. La ubicación de los pozos se muestra en la **Figura 1**.

La columna de separación de volátiles o "Air Stripper" fue desactivada, pero se mantuvo lista para reiniciar su operación. La columna de separación de volátiles sería reactivada si se observara que las concentraciones de BTEX en muestras captadas a la salida del separador agua/producto sobrepasaran los



Límites de Limpieza propuestos para ser aplicados dentro de la Planta, y sería mantenida en operación hasta que estas concentraciones vuelvan a ser menores que los Límites de Limpieza.

Tomando en cuenta los resultados analíticos disponibles, se propuso no continuar muestreando los pozos de recuperación que fueron desactivados: PM-14 al 16, PM-18, PM-19, PM-21, PM-25, PM-26, PM-28, PM-29, PM-30, PM-32 y PM-33, así como cerrar permanentemente los pozos PM-8 y PM-23, los cuales están ubicados lateralmente al gradiente y fuera de los límites del agua subterránea impactada.

MUESTREO Y CIERRE DE POZOS DE MONITOREO.

Al igual que ocurrió con el sistema de recuperación y tratamiento de agua subterránea, existe un número de pozos de monitoreo que no representan beneficio a la remediación, ya que las concentraciones residuales de BTEX en el agua subterránea se redujeron hasta niveles de no detección, gracias a la efectividad de las acciones de remediación implementadas.

Los pozos de monitoreo PM-2, PM-4 y PM-5, ubicados aguas arriba o lateralmente al gradiente del flujo del agua subterránea con respecto al flujo de fuga, fueron cerrados definitivamente en Agosto de 2001 luego que a la Planta se le solicitó la donación de la franja de terreno en la cual habían sido instalados estos pozos para la construcción de una carretera municipal. Al momento de su cierre, los registros analíticos indicaban que estos pozos habían estado libres de impacto por más de un año, por lo que no fue necesario sustituirlos por pozos nuevos.

Adicionalmente se propuso cerrar permanentemente los pozos PM-7, PM-22 y PM-36, los cuales fueron instalados con el propósito de delinear la extensión del agua subterránea impactada por la fuga accidental de gasolina y se observó que están fuera del área del agua subterránea impactada. Los resultados analíticos de muestras de agua subterránea captadas en estos pozos siempre estuvieron por debajo de los límites de detección del laboratorio. También se propuso suspender el muestreo de los pozos de monitoreo PM-6, PM-30, PM-31, PM-34 y PM-35. La Tabla 11 provee una justificación para la suspensión del muestreo de cada uno de estos pozos.

TABLA 11 RESUMEN DE RESULTADOS ANALÍTICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Tipo de pozo	Identificación del punto de muestreo	Fecha de muestreo	Benceno (mg/L)	Tolueno (mg/L)	Etilbenceno (mg/L)	Xileno (mg/L)	Propuesta para uso del pozo
Límite de Limpieza fuera de la Planta			0.14	10.4	5.21	104	
Límite de Limpieza dentro de la Planta			0.617	20.4	10.2	198	
Pozo de servicio	E-1	17-2-00	0.0018	0.0049	<0.00247	<0.00417	Abastecimiento principal de la Planta
		10-4-00	<0.002	<0.004	<0.013	0.0004	
		13-6-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.0260	
		21-7-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.0260	
		12-9-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.0260	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004			
13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004			
Pozo de servicio	E-2	17-2-00	0.3683	0.4789	<0.00247	0.3168	Abastecimiento principal de la Planta
		10-4-00	0.045	0.079	<0.013	0.1996	
		5-5-00	0.079	0.09	<0.03	0.047	
		6-6-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	0.0266	



		13-6-00	0.0167	0.0222	<0.0103	0.3372	
		21-7-00	0.014	0.035	<0.0103	0.217	
		18-8-00	<0.0027	0.006	<0.0103	0.039	
		12-9-00	0.0047	0.0447	<0.0103	0.3468	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	0.05	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	E-3	17-2-00	21.87	36.46	5.87	21.76	Abastecimiento parcial de la Planta
		13-6-00	0.9905	1.0286	0.1177	0.4468	
		12-9-00	Producto				
		16-5-01	0.015	0.017	0.007	0.036	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	0.089	
		21-11-01	<0.004	<0.004	<0.003	0.05	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	0.016	
		21-5-02	<0.004	0.005	0.003	0.021	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de monitoreo en el área de la fuga	PM-1	23-2-00	0.0199	0.136	<0.00247	0.0294	Muestreo
		11-4-00	0.009	0.005	<0.013	0.0138	
		13-6-00	0.002	0.0018	<0.0103	0.0011	
		12-9-00	0.0053	<0.0057	<0.0103	<0.003	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-9-01	0.274	6.593	2.247	14.927	
		22-10-01	0.056	0.546	0.056	5.297	
		21-11-01	0.072	0.824	0.6	4.269	
		9-1-02	<0.004	0.02	0.001	0.217	
		21-5-02	0.078	1.394	0.66	4.237	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de monitoreo gradiente arriba	PM-2	23-2-00	<0.00151	<0.00361	<0.00247	<0.00417	Cerrado definitivamente el 4-Agosto-01
		11-4-00	<0.002	<0.004	<0.013	0.0004	
		30-5-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.0260	
		13-6-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	0.0042	
		12-9-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.0260	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-3	23-2-00	1.88	0.3146	<0.00247	0.5516	Abastecimiento parcial de la Planta
		11-4-00	4.396	3.36	0.606	4.8388	
		13-6-00	4.8275	0.4156	0.1644	1.2213	
		12-9-00	3.5105	14.9325	1.867	11.062	
		16-5-01	2.022	1.537	0.171	1.389	
		15-6-01	4.362	3.425	0.49	2.293	
		19-9-01	0.114	0.231	0.078	2.24	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	0.219	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de monitoreo gradiente arriba	PM-4	23-2-00	1.178	2.095	0.115	1.484	Cerrado definitivamente el 4-Agosto-01
		11-4-00	0.009	0.008	<0.003	0.0419	
		30-5-00	0.009	0.04	0.022	0.437	
		13-6-00	0.0017	0.0015	<0.0103	0.0643	
		12-9-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	0.026	



		18-1-01 16-5-01	<0.004 <0.004	<0.004 <0.004	<0.003 <0.003	<0.004 <0.004	
Pozo de monitoreo gradiente arriba	PM-5	23-2-00 11-4-00 30-5-00 13-6-00 12-9-00 18-1-01 16-5-01	<0.00151 <0.002 <0.0027 <0.0027 <0.0027 <0.004 <0.004	<0.00361 <0.004 <0.0057 <0.0057 <0.0057 <0.004 <0.004	<0.00247 <0.013 <0.0103 <0.0103 <0.0103 <0.003 <0.003	<0.00417 0.0008 <0.026 <0.026 <0.026 <0.004 <0.004	Cerrado definitivamente el 4-Agosto-01
Pozo de monitoreo gradiente arriba	PM-6	23-2-00 11-4-00 13-6-00 12-9-00 18-1-01 16-5-01 19-9-01 9-1-02 21-5-02 13-9-02	<0.00151 <0.002 <0.0027 <0.0027 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	<0.00361 <0.004 <0.0057 <0.0057 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	<0.00247 <0.013 <0.0103 <0.0103 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003	<0.00417 0.0005 <0.026 <0.026 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	Suspender muestreo
Pozo de monitoreo gradiente abajo	PM-7	9-3-00 10-4-00 13-6-00 12-9-00 18-1-01 16-5-01 19-9-01 9-1-02 21-5-02 13-9-02	<0.00151 <0.002 <0.0027 <0.0027 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	<0.00361 <0.004 <0.0057 <0.0057 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	<0.00247 <0.013 <0.0103 <0.0103 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003	<0.00417 0.0031 <0.026 <0.026 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	Cerrar definitivamente
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-8	9-3-00 10-4-00 13-6-00 12-9-00 18-1-01 16-5-01 19-9-01 9-1-02 21-5-02 13-9-02	<0.00151 <0.002 <0.0027 <0.0027 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	<0.00361 <0.004 <0.0057 <0.0057 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	<0.00247 <0.013 <0.0103 <0.0103 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003	<0.00417 0.0001 <0.026 <0.026 <0.004 <0.004 0.035 <0.004 <0.004 <0.004	Cerrar definitivamente
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-9	9-3-00 10-4-00 12-9-00 18-1-01 16-5-01 19-9-01 21-11-01 9-1-02 21-5-02 13-9-02	Producto Producto Producto <0.004 0.06 0.816 <0.004 0.052 <0.004 <0.004	 <0.004 0.015 2.592 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	 <0.003 <0.003 0.077 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003	<0.004 0.039 8.98 0.598 0.28 <0.004 <0.004	Suspender muestreo
Pozo de recuperación gradiente	PM-10	9-3-00 10-4-00 12-9-00	2.105 Producto Producto	0.842	0.032	1.32	Suspender muestreo



abajo		18-1-01 16-5-01 19-9-01 21-11-01 9-1-02 21-5-02 13-9-02	0.008 0.695 0.017 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	0.001 0.466 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	<0.003 0.273 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003	<0.004 2.138 0.121 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-11	9-3-00 10-4-00 12-9-00 18-1-01 16-5-01 19-9-01 9-1-02 21-5-02 13-9-02	22.55 Producto 4.413 2.18 1.356 0.162 0.052 0.103 0.008	46.63 21.23 10.258 4.056 0.188 0.051 0.028 <0.004	4.51 2.691 2.507 1.55 <0.003 0.088 <0.003 0.004	12.08 20.187 14.037 8.396 1.762 0.539 0.428 0.04	Muestreo
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-11A	12-9-00 16-5-01 19-9-01 9-1-02 21-5-02 13-9-02	6.791 1.389 <0.004 0.005 0.194 0.008	51.175 0.969 0.035 <0.004 0.182 <0.004	3.1115 0.533 <0.003 <0.003 0.026 <0.003	28.066 4.099 0.168 0.072 1.416 0.01	Abastecimiento parcial de la Planta
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-12	13-6-00 18-1-01 16-5-01 19-9-01 21-11-01 9-1-02 21-5-02 13-9-02	0.3691 <0.004 0.031 0.444 0.78 <0.004 <0.004 <0.004	0.2585 <0.004 0.065 0.609 0.194 <0.004 <0.004 <0.004	0.0506 <0.003 0.012 0.066 0.094 <0.003 <0.003 <0.003	0.321 <0.004 0.531 2.06 1.49 0.088 0.004 <0.004	Abastecimiento parcial de la Planta
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-13	12-9-00 16-5-01 15-2-02 21-5-02	0.2892 0.33 <0.004 <0.004	1.384 0.341 <0.004 <0.004	0.9366 0.326 <0.003 <0.003	3.807 1.421 0.009 <0.004	Abastecimiento parcial de la Planta
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-14	12-9-00 18-1-01 16-5-01 19-9-01 9-1-02 21-5-02 13-9-02	0.0126 <0.004 0.027 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	0.0324 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	<0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003	0.3187 <0.004 0.025 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	Suspender muestreo
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-15	12-9-00 16-5-01 15-2-02 21-5-02	0.356 0.135 0.005 <0.004	0.4488 <0.004 <0.004 <0.004	0.0703 <0.003 <0.003 <0.003	1.0138 <0.004 0.073 <0.004	Suspender muestreo
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-16	12-9-00 18-1-01 16-5-01 19-9-01 9-1-02 21-5-02 13-9-02	<0.0027 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	<0.0057 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	<0.0103 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003 <0.003	<0.026 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004 <0.004	Suspender muestreo



Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-17	12-9-00	2.87	5.149	0.605	2.405	Abastecimiento parcial de la Planta
		16-5-01	2.193	0.685	0.661	1.11	
		19-9-01	0.775	4.322	0.783	8.91	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	0.05	0.015	<0.003	0.432	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-18	12-9-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	Suspender muestreo
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-19	12-9-00	0.5164	0.4461	0.0168	0.4823	Suspender muestreo
		16-5-01	0.937	0.824	0.15	2.607	
		15-6-01	0.702	0.751	0.006	1.927	
		19-9-01	0.285	0.22	0.043	2.238	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-20	10-4-00	0.12	0.261	0.04	0.4505	Abastecimiento parcial de la Planta
		13-6-00	0.1174	0.2414	0.036	0.2666	
		12-9-00	0.0912	0.087	<0.0103	0.407	
		15-6-01	0.01	<0.004	<0.003	0.015	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-21	10-4-00	0.349	0.041	<0.013	0.331	Muestreo
		19-4-00	2.75	0.32	<0.03	1.41	
		26-4-00	1.95	0.21	<0.03	1.21	
		5-5-00	3.373	0.168	<0.03	0.06	
		12-5-00	3.35	0.07	<0.03	0.46	
		19-5-00	2.3904	0.066	0.061	0.315	
		13-6-00	1.7392	0.0134	<0.0103	0.0492	
		23-6-00	0.601	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		7-7-00	0.427	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		21-7-00	0.355	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		4-8-00	0.054	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		18-8-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		12-9-00	0.0037	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		5-10-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		24-10-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		13-11-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		29-11-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		13-12-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		5-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-2-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		5-3-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		22-3-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		15-6-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		18-7-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
17-8-01	<0.004	0.032	<0.003	<0.004			
19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004			
22-10-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004			
16-11-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004			
19-12-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004			



		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		15-2-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		15-4-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		29-7-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de monitoreo gradiente abajo	PM-22	10-4-00	<0.002	<0.004	<0.013	0.0008	Cerrar definitivamente
		19-4-00	<0.02	<0.02	<0.03	<0.01	
		26-4-00	<0.02	<0.02	<0.03	<0.01	
		5-5-00	<0.02	<0.02	<0.03	<0.01	
		19-5-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		13-6-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		12-9-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-23	10-4-00	0.012	<0.004	<0.013	0.0682	Cerrar definitivamente
		19-4-00	0.04	<0.02	<0.003	0.06	
		26-4-00	0.01	<0.02	<0.003	<0.01	
		5-5-00	<0.02	<0.02	<0.003	<0.01	
		19-5-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		13-6-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		12-9-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		15-6-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-24	12-9-00	1.2182	6.353	2.0396	7.2485	Abastecimiento parcial de la Planta
		16-5-01	0.574	0.79	0.253	1.624	
		19-9-01	0.111	0.676	0.078	4.211	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	0.005	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-25	12-9-00	0.7066	2.2296	0.4347	4.6	Suspender muestreo
		16-5-01	0.135	0.051	<0.003	0.159	
		15-2-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-26	12-9-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	Suspender muestreo
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-27	12-9-00	0.382	1.299	0.1905	1.9125	Abastecimiento parcial de la Planta y Muestreo
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	0.022	
		19-9-01	0.101	0.354	0.033	1.108	
		9-1-02	0.079	0.031	0.059	0.381	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	0.003	



		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-28	12-9-00	2.0555	1.28	0.0516	1.8895	Suspender muestreo
		16-5-01	0.142	0.034	0.029	0.094	
		19-9-01	<0.004	0.101	0.012	0.175	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-29	12-9-00	1.0372	0.9683	0.1083	1.0773	Muestreo
		18-1-01	0.68	0.131	<0.003	0.353	
		16-5-01	<0.004	0.004	<0.003	0.025	
		19-9-01	0.271	0.133	<0.003	0.628	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de monitoreo gradiente abajo	PM-30	12-9-00	0.244	0.0401	<0.003	0.034	Suspender muestreo
		15-2-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de monitoreo gradiente abajo	PM-31	13-6-00	0.0447	0.0013	<0.0103	0.0153	Suspender muestreo
		12-9-00	0.0052	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-32	13-6-00	1.1653	0.3676	0.0341	0.3994	Suspender muestreo
		12-9-00	Producto				
		18-1-01	Producto				
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	0.004	
		19-9-01	0.02	<0.004	<0.003	0.09	
		21-11-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de recuperación gradiente abajo	PM-33	13-6-00	0.5045	0.0114	<0.0103	0.1365	Muestreo
		7-7-00	0.772	<0.0057	<0.0103	0.25	
		21-7-00	0.504	<0.0057	<0.0103	0.07	
		4-8-00	0.199	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		18-8-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		12-9-00	0.012	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		24-10-00	0.4846	0.0071	<0.003	0.063	
		13-11-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		29-11-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		13-12-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		5-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-2-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		5-3-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		22-3-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		18-7-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	



		17-8-01	<0.004	0.074	<0.003	<0.004	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	0.074	
		22-10-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-11-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-12-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		15-2-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		15-4-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		29-7-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de monitoreo gradiente abajo	PM-34*	6-6-00	0.2016	<0.0057	<0.0103	0.0409	Suspender muestreo
		13-6-00	0.0089	<0.0057	<0.0103	0.0127	
		23-6-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		7-7-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		21-7-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		4-8-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		18-8-00	0.005	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		12-9-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		24-10-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		13-11-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		29-11-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		13-12-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		5-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-2-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		5-3-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		22-3-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		18-7-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		17-8-01	<0.004	0.05	<0.003	<0.004	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		22-10-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-11-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-12-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		15-2-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		15-4-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		29-7-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de monitoreo gradiente abajo	PM-35*	6-6-00	0.4572	<0.0057	<0.0103	0.1039	Suspender muestreo
		13-6-00	0.2758	<0.0057	<0.0103	0.0332	
		23-6-00	0.099	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		7-7-00	0.028	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		21-7-00	0.007	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		4-8-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		18-8-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		12-9-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		5-10-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		24-10-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		13-11-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		29-11-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		13-12-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	



		5-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-2-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		5-3-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		22-3-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		18-7-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		17-8-01	<0.004	0.029	<0.003	<0.004	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		22-10-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-11-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-12-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		15-2-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		15-4-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		29-7-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo de monitoreo gradiente abajo	PM-36*	6-6-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		13-6-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		12-9-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo externo	Parque industrial La Silla*	21-7-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	Muestrear
		4-10-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo externo	Rancho 14 de Marzo*	21-7-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	Muestrear
		4-10-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		9-1-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		21-5-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
		13-9-02	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	
Pozo externo	Parque industrial Pueblo Nuevo*	21-7-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	Muestrear
		4-10-00	<0.0027	<0.0057	<0.0103	<0.026	El acceso a este pozo fue cerrado el:
		18-1-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	9-1-02
		16-5-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	21-5-02
		19-9-01	<0.004	<0.004	<0.003	<0.004	13-9-02
		9-1-02					
		21-5-02					
		13-9-02					

NOTA: Los resultados que exceden los Límites de Limpieza están en **negritas**.

< : el resultado es menor al límite de detección indicado.

* : los resultados de estos pozos son comparados con los Límites de Limpieza aplicables fuera de la Planta.



SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE VAPORES DEL SUELO.

En los meses de Julio y Agosto de 2001, la Planta instaló dos sistemas de extracción de vapores. SVE 1 Y SVE 2 (SVE = Soil Vapor Extraction System) respectivamente, con el objeto de remover residuos de gasolina que pudiesen estar atrapados en el suelo por encima de la mesa de agua. En cada sistema se conectó un grupo de pozos a una bomba de vacío, y los vapores captados fueron dirigidos hacia una chimenea de descarga. Las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles en las emisiones de los dos sistemas fueron evaluadas en sitio periódicamente, utilizando un analizador de fotoionización portátil (PID = Photoionization Detector), el cual es calibrado con un gas estándar (por ejemplo, Isobutileno de concentración conocida) y es capaz de detectar mezclas de compuestos orgánicos volátiles. Las lecturas obtenidas con el PID en las chimeneas de descarga de emisiones de los dos sistemas SEV presentaron una disminución progresiva, hasta hacerse asintóticas en un periodo de 30 días después del arranque.

La CNA aprobó la suspensión temporal de la operación del sistema SVE 2 y el bombeo de los pozos E-3, PM-9, PM-10, PM-12, y PM-32, entre el 11 de Noviembre de 2001 y el 12 de Febrero de 2002. El objetivo de esta acción fue el de determinar si ocurriría un cambio en las concentraciones de BTEX presentes como vapores en el suelo y disueltas en el agua subterránea durante el cese temporal de las operaciones de bombeo y extracción de vapores. La comparación de los resultados analíticos de muestras de agua subterránea tomadas cuando la operación del sistema SVE 2 estaba suspendida con muestras tomadas luego de reactivar la operación del mismo, demostraron que las concentraciones de BTEX se habían estabilizado o habían disminuido durante este periodo. Esto indica que no hubo reagrupamiento de compuestos de BTEX, lo que sugiere que el continuar la operación del SVE tendría un efecto mínimo sobre la remediación del área.

Adicionalmente, una vez reactivado el sistema SVE 2, el día 12 de Febrero de 2002, se captó una muestra de las emisiones en la descarga de la chimenea, para analizar la presencia específica de BTEX. Los resultados analíticos indicaron que no hubo presencia de compuestos de BTEX por encima de los límites de detección del laboratorio. Esto indica que ya no se estaba recuperando BTEX del subsuelo por medio de la extracción de vapores.

La evaluación de lo anterior sugirió que el continuar con la operación de los sistemas de extracción de vapores ya no tendría efecto sobre la tasa de remoción de los residuos de BTEX presentes, por lo que se propuso la desactivación permanente de los sistemas SVE 1 y SVE 2.

PLAN DE MUESTREO DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

Se propuso el siguiente Plan de Muestreo para evaluar la tendencia de la calidad del agua subterránea en el área de la Planta:

- Los pozos PM-1, PM-9, PM-11, PM-21, PM-27, PM-29 y PM-33, fueron muestreados con una frecuencia semestral y las muestras fueron sometidas a análisis de BTEX. Estos pozos fueron escogidos con base a su historial de resultados analíticos y a su ubicación estratégica con respecto al área donde se registró impacto al agua subterránea.
- Si las concentraciones de BTEX en alguno de estos pozos se mantenían por debajo de los Límites de Limpieza propuestos durante dos eventos consecutivos de muestreo, se solicitó a la reducción en la frecuencia del muestreo, pasando a realizarlo anualmente. Si los Límites de Limpieza aplicables dentro de la Planta eran excedidos, se regresaría al muestreo semestral.
- Si las concentraciones de BTEX se mantenían por debajo de los Límites de Limpieza en todos los pozos por espacio de dos eventos consecutivos de muestreo, entonces se podría solicitar el cierre de todos los pozos.



CUANTIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES FASES EN QUE SE ENCUENTRA LA GASOLINA ACCIDENTALMENTE FUGADA EN LA PLANTA.

La siguiente información tiene como objetivo presentar un estimado del volumen de gasolina recuperada en la Planta, durante el período comprendido entre Enero de 2000 y Junio de 2002, y evaluar las condiciones en las cuales el volumen restante del total estimado de gasolina fugada estaría presente en el subsuelo de la Planta.

Determinación del volumen de gasolina recuperado mediante las acciones de remediación implementadas.

La evaluación realizada incluyó la revisión de distintos reportes que han sido preparados para documentar las actividades llevadas a cabo en la Planta con relación a la remediación del agua subterránea, así como las series de datos de laboratorio que se han generado. Esta información fue utilizada para estimar el volumen de gasolina recuperado entre Enero de 2000 y Junio de 2002. El volumen total de gasolina recuperado fue determinado sumando los volúmenes recuperados por el sistema de remediación del agua subterránea, las actividades de remoción de producto en fase libre, las actividades de excavación de suelos relacionadas con la desincorporación del tanque de gasolina, y la operación de los sistemas de extracción de vapores del suelo. En total, el volumen de gasolina recuperado se estima que fue de **5,886 litros**. La **Tabla 12** presenta un resumen de los volúmenes de gasolina recuperados mediante cada una de las acciones de remediación aplicadas en la Planta.

TABLA 12 VOLUMEN TOTAL DE GASOLINA RECUPERADA EN LA PLANTA ENTRE ENERO DE 2000 Y JUNIO DE 2002 ⁽¹⁾

Medio	Constituyente	Masa Total Recuperada ⁽²⁾ (Kg)	Composición Porcentual de BTEX en Gasolina ⁽³⁾			Factor de Conversión para Gasolina ⁽⁴⁾	Masa Correspondiente de Gasolina Recuperada ⁽⁵⁾ (Kg)	Densidad de la Gasolina ⁽⁶⁾ (Kg/l)	Volumen Correspondiente de Gasolina ⁽⁷⁾ (Lt)
			(mín)	(máx)	(prom)				
Agua Subterránea	Total BTEX	651.88	6.43%	36.47%	21.45%	4.66	3,040	0.73	4,165
Hidrocarburo en Fase Libre	Gasolina	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.73	1,569
Suelo de Relleno	TPH	60.00	NA	NA	NA	NA	NA	0.73	82
Vapores del Suelo ⁽⁸⁾	TPH	51.45	NA	NA	NA	NA	NA	0.73	70

NA - NO APLICA

Volumen total recuperado = 5,886 litros

NOTAS:

- (1) No incluye reducción en la masa de gasolina fugada debida a biodegradación o volatilización.
- (2) Basado en los datos presentados en la Tabla 13.
- (3) Valores Tabulados. Fuente: Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Volume 3: Selection of Representative TPH Fractions Based of Fate and Transport Considerations, Amherst Scientific Publishers, 1997.
- (4) Factor de Conversión = Composición porcentual de gasolina pura (100%) / composición porcentual promedio de BTEX en gasolina (21.45%)
- (5) Masa Correspondiente de Gasolina Recuperada = masa de BTEX recuperada * factor de conversión.
- (6) Valores Tabulados. Fuente: Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Volume 3: Selection of Representative TPH Fractions Based of Fate and Transport Considerations, Amherst Scientific Publishers, 1997.
- (7) Valores Tabulados. Fuente: Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Volume 3: Selection of Representative TPH Fractions Based of Fate and Transport Considerations, Amherst Scientific Publishers, 1997.
- (8) Volumen recuperado por los sistemas de extracción de vapores de suelo entre el arranque de las operaciones el 21 de Agosto de 2001 y el 11 de Mayo de 2002.



Volumen de gasolina removido por el sistema de recuperación y tratamiento de agua subterránea.

El volumen de hidrocarburos de gasolina en fase disuelta removido por el sistema de remediación del agua subterránea fue determinado utilizando los resultados analíticos de las muestras captadas a la entrada de la columna de separación de volátiles y el volumen de agua subterránea que se calcula fue tratada en el periodo entre dos muestreos consecutivos (las concentraciones obtenidas para una fecha de muestreo se aplicaron al volumen tratado entre esa fecha de muestreo y la anterior). Los resultados de Benceno, Etilbenceno, Tolueno y Xileno totales (BTEX) obtenidos para las muestras de agua subterránea fueron sumados para obtener una concentración de BTEX total. La concentración de BTEX total fue multiplicada por el volumen tratado durante el periodo correspondiente, para obtener una masa de BTEX total recuperada:

$$\text{Masa de BTEX total recuperada (mg)} = \text{Concentración de BTEX total (mg/L)} * \text{Volumen tratado (L)}$$

La masa de BTEX total recuperada fue transformada en masa de gasolina recuperada utilizando un factor de conversión de 4.66 derivado, dividiendo la composición total de la gasolina (100%) entre la composición porcentual promedio de BTEX en gasolina (21.45%), según la información proporcionada por el THP Criteria Work Group (Grupo de Trabajo sobre Criterios de Hidrocarburos Totales de Petróleo, 1998). Por último, la masa de gasolina recuperada fue dividida por la densidad de la gasolina (0.73 Kg/L) para obtener el volumen equivalente de gasolina recuperada **Tabla 12**. En la **Tabla 13**, se presenta un resumen de datos del sistema de recuperación y tratamiento de agua subterránea.



TABLA 13 MASA DE BTEX RECUPERADA POR EL SISTEMA DE REMEDIACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Fecha	Extracción de Agua Subterránea	Resultados de las muestras captadas a la entrada del Sistema de Remediación del Agua Subterránea	Masa de BTEX recuperada por el Sistema de Remediación del Agua Subterránea
-------	--------------------------------	--	--

	Pozo de servicio E-2 (m ³)	Sistema de Remediación (m ³)	Volumen Total de Agua Subterránea Extraída (m ³)	Volumen de Agua Subterránea Extraída entre muestreos consecutivos (m ³)	Benceno (mg/l)	Tolueno (mg/l)	Etilbenceno (mg/l)	Xileno (mg/l)	Total BTEX (mg/l)	Total BTEX (masa) (Kg)
17-1-00	4,049									
31-1-00	2,321									
14-2-00	1,512									
28-2-00	2,368									
13-3-00	2,714									
3-4-00	3,873									
17-4-00	3,294	616	3,910							
24-4-00		1,560	1,560							
26-4-00				5,470	1,560	2,170	0,310	2,510	6,550	35,83
1-5-00	1,775	1,885	3,660							
5-5-00				3,660	3,66	6,686	1,057	4,820	16,223	59,38
8-5-00		1,897	1,897							
15-5-00	4,200	831	5,031							



22-5-00		1,377	1,377							
29-5-00	2,945	1,665	4,610							
5-6-00	831	2,243	3,074							
12-6-00	1,220	2,946	4,166							
13-6-00				20,155	1,197	2,897	0,552	4,270	9,715	195,81
19-6-00	130	2,401	2,531							
26-6-00	1,100	2,791	3,891							
3-7-00	183	3,110	3,293							
7-7-00				9,715	1,197	1,103	ND	1,940	4,240	41,19
10-7-00	0	2,490	2,490							
17-7-00	2,360	2,819	5,179							
21-7-00				7,669	1,153	1,318	0,258	1,902	4,631	35,52
24-7-00	66	3,814	3,880							
31-7-00	0	3,713	3,713							
4-8-00				7,593	1,278	1,577	0,210	1,606	4,671	35,46
7-8-00	0	3,543	3,543							
14-8-00	32	3,997	4,029							
18-8-00				7,572	1,323	1,302	0,157	1,922	4,704	35,62
21-8-00	0	3,694	3,694							
28-8-00	0	3,842	3,842							
4-9-00	0	3,287	3,287							
11-9-00	62	3,840	3,902							
12-9-00				14,725	0,251	0,166	ND	0,241	0,658	9,69
18-9-00	0	3,495	3,495							
25-9-00	0	3,993	3,993							
2-10-00	0	4,068	4,068							



5-10-00				11,556	2,035	2,324	0,012	0,136	4,506	52,07
9-10-00	0	3,581	3,581							
16-10-00	0	3,659	3,659							
23-10-00	0	3,662	3,662							
24-10-00				10,902	1,857	2,749	ND	3,222	7,828	85,34
30-10-00	0	2,274	2,274							
6-11-00	0	3,159	3,159							
13-11-00	0	3,928	3,928	9,361	0,534	0,800	0,111	0,993	2,438	22,82
20-11-00	0	3,397	3,397							
27-11-00	0	3,798	3,798							
29-11-00				7,195	0,275	0,113	ND	0,495	0,882	6,35
4-12-00	0	3,132	3,132							
11-12-00	0	2,619	2,619							
13-12-00				5,751	0,646	1,055	0,063	1,286	3,049	17,54
18-12-00	0	2,686	2,686							
25-12-00	0	1,471	1,471							
1-1-01	0	3,112	3,112							
5-1-01				7,269	0,152	0,058	ND	0,29	0,500	3,63
8-1-01	0	2,692	2,692							
15-1-01	12	2,284	2,296							
18-1-01				4,988	ND	ND	ND	ND	0,000	0,00
22-1-01	0	2,572	2,572							
29-1-01	0	3,052	3,052							
5-2-01	0	2,682	2,682							
12-2-01	0	2,799	2,799							
16-2-01				11,105	ND	ND	ND	ND	0,000	0,00



19-2-01	81	2,685	2,766							
26-2-01		1,656	1,656							
5-3-01		2,269	2,269	6,691	ND	ND	ND	ND	0.000	0.00
12-3-01		2,676	2,676							
19-3-01		2,566	2,566							
22-3-01				5,242	ND	ND	ND	ND	0.000	0.00
26-3-01		2,583	2,583							
2-4-01		3,099	3,099							
9-4-01		3,036	3,036							
16-4-01		2,976	2,976							
23-4-01		2,874	2,874							
30-4-01		2,714	2,714							
7-5-01		2,823	2,823							
14-5-01		2,724	2,724							
16-5-01				22,829	0.009	ND	ND	ND	0.009	0.21
21-5-01		2,072	2,072							
28-5-01		3,329	3,329							
4-6-01		3,300	3,300							
11-6-01		2,483	2,483							
18-6-01		1,905	1,905							
25-6-01		1,803	1,803							
2-7-01		947	947							
9-7-01		1,836	1,836							
16-7-01		1,833	1,833							
18-7-01				19,535	0.049	0.049	0.008	0.072	0.178	3.48
23-7-01		3,071	3,071							



30-7-01		2,932	2,932							
6-8-01		2,944	2,944							
13-8-01		2,449	2,449							
17-8-01				11,396	ND	0.024	ND	ND	0.024	0.27
20-8-01		2,359	2,359							
27-8-01		2,350	2,350							
3-9-01		2,816	2,816							
10-9-01		2,694	2,694							
17-9-01		2,771	2,771							
19-9-01				12,990	ND	0.015	ND	ND	0.015	0.19
24-9-01		2,665	2,665							
1-10-01		2,641	2,641							
8-10-01		2,666	2,666							
15-10-01		2,672	2,672							
22-10-01		3,751	3,751	14,395	0.062	0.037	ND	0.297	0.396	5.7
29-10-01		3,071	3,071							
5-11-01		2,688	2,688							
12-11-01		2,856	2,856							
19-11-01		2,739	2,739							
21-11-01				11,354	0.042	0.027	0.024	0.384	0.477	5.42
26-11-01		2,840	2,840							
3-12-01		2,414	2,414							
10-12-01		2,489	2,489							
17-12-01		1,893	1,893							
19-12-01				9,636	ND	ND	ND	ND	0.000	0.00
24-12-01		1,594	1,594							



31-12-01		1,897	1,897							
7-1-02		2,186	2,186							
9-1-02				5,677	0,006	ND	ND	0,031	0,037	0,21
14-1-02		2,647	2,647							
21-1-02		2,415	2,415							
28-1-02		2,691	2,691							
4-02-02		1,937	1,937							
11-2-02		2,949	2,949							
15-2-02				12,639	ND	ND	ND	0,012	0,012	0,15
18-2-02		2,265	2,265							
25-2-02		2,437	2,437							
4-3-02		2,968	2,968							
11-3-02		2,906	2,906							
18-3-02		2,053	2,053							
25-3-02		2,927	2,927							
1-4-02		3,042	3,042							
8-4-02		2,831	2,831							
15-4-02		2,920	2,920	21,429	ND	ND	ND	ND	0,000	0,00
22-4-02		2,310	2,310							
29-4-02		2,800	2,800							
6-5-02		2,720	2,720							
13-5-02		2,733	2,733							
20-5-02		2,364	2,364							
21-5-02				12,927	ND	ND	ND	ND	0,000	0,00
27-5-02		1,545	1,545							
3-6-02		1,872	1,872							



10-6-02		2.469	2.469							
---------	--	-------	-------	--	--	--	--	--	--	--

ND = NO DETECTABLE

Masa de BTEX recuperada por el Sistema
de Remediación del Agua Subterránea = 651.88
(kg)

**Gasolina en Fase Libre.**

El volumen de gasolina o hidrocarburos de gasolina recuperados mediante la remoción de material en fase libre fue determinado utilizando la información correspondiente al separador agua/producto del sistema de remediación e información sobre material recuperado mediante achique manual de algunos pozos. Hasta el 13 de Agosto de 2001 se habrían recuperado unos **1,569 litros** de gasolina en fase libre en la Planta. En la **Tabla 14** se presenta un resumen de los datos relativos a la recuperación de gasolina en fase libre.

TABLA 14 RECUPERACIÓN DE GASOLINA EN FASE LIBRE

Gasolina en Fase Libre Recuperada (litros)				
Fecha	Recuperación Manual	Separador Agua/Productos	Subtotal de Gasolina en Fase Libre Recuperada	Subtotal Acumulado de Gasolina en Fase Libre Recuperada
26-1-00	50		50	50
31-1-00				
7-2-00	10		10	60
14-2-00	10		10	70
21-2-00	10		10	80
28-2-00	20		20	100
6-3-00	25		25	125
13-3-00	15		15	140
20-3-00	15		15	155
27-3-00	15		15	170
3-4-00	15		15	185
10-4-00	15		15	200
17-4-00		100	100	300
24-4-00		300	300	600
1-5-00		300	300	900
8-5-00		100	100	1.000
15-5-00		100	100	1.100
22-5-00		50	50	1.150
29-5-00		50	50	1.200
5-6-00		50	50	1.250
12-6-00		49	49	1.299
19-6-00		49	49	1.348
26-6-00	2	35	37	1.385
3-7-2000	1	28	29	1.414
10-7-00	1	21	22	1.436



17-7-00	1	21	22	1.458
24-7-00	1	21	22	1.480
31-7-00	1	14	15	1.495
7-8-00	0.5	7	7.5	1503
14-8-00	0.2	3.5	3.7	1506
21-8-00	0.2	3.5	3.7	1.510
28-8-00	0	1	1.0	1.511
4-9-00	0.5	3.5	4.0	1.515
11-9-00	8	3.5	11.5	1.526
18-9-00	1	3.5	4.5	1.531
25-9-00	1	3.5	4.5	1.535
2-10-00	1	3.5	4.5	1.540
9-10-00	1	3.5	4.5	1.544
16-10-00	1	3.5	4.5	1.549
23-10-00	1	3.5	4.5	1.553
30-10-00	1	2.5	3.5	1.557
6-11-00	1	2.5	3.5	1.560
13-11-00	1	2.5	3.5	1.564
20-11-00	1	2.5	3.5	1.567
27-11-00	0	1.5	1.5	1.569
4-12-00	0	0	0	1.569
11-12-00	0	0	0	1.569
18-12-00	0	0	0	1.569
25-12-00	0	0	0	1.569
1-1-01	0	0	0	1.569
8-1-01	0	0	0	1.569
15-1-01	0	0	0	1.569
22-1-01	0	0	0	1.569
29-1-01	0	0	0	1.569
5-2-01	0	0	0	1.569
12-2-01	0	0	0	1.569
19-2-01	0	0	0	1.569
26-2-01	0	0	0	1.569
5-3-01	0	0	0	1.569
12-3-01	0	0	0	1.569
19-3-01	0	0	0	1.569
26-3-01	0	0	0	1.569
2-4-01	0	0	0	1.569



9-4-01	0	0	0	1.569
16-4-01	0	0	0	1.569
23-4-01	0	0	0	1.569
30-4-01	0	0	0	1.569
7-5-01	0	0	0	1.569
14-5-01	0	0	0	1.569
21-5-01	0	0	0	1.569
28-5-01	0	0	0	1.569
4-6-01	0	0	0	1.569
11-6-01	0	0	0	1.569
18-6-01	0	0	0	1.569
25-6-01	0	0	0	1.569
2-7-01	0	0	0	1.569
9-7-01	0	0	0	1.569
16-7-01	0	0	0	1.569
23-7-01	0	0	0	1.569
30-7-01	0	0	0	1.569
6-8-01	0	0	0	1.569
13-8-01	0	0	0	1.569

VOLUMEN TOTAL DE GASOLINA EN FASE LIBRE RECUPERADO = 1,569 LITROS



GASOLINA RECUPERADA CON EL MATERIAL EXCAVADO.

El volumen de gasolina recuperado durante la excavación y desincorporación del tanque subterráneo de gasolina, fue determinado utilizando los resultados analíticos de las muestras del material de relleno que rodeaba el tanque, captadas durante una investigación preliminar realizada en Febrero de 2000, y el volumen estimado de material removido durante estas operaciones. Durante la investigación preliminar se capturaron dos muestras de material de relleno a una profundidad de 3 m, las cuales se estima estaban ubicadas por debajo de la base del tanque de gasolina. Los resultados analíticos de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH, Total Petroleum Hydrocarbons) obtenidos para estas muestras fueron promediados para obtener una concentración aplicable al volumen total de material de relleno removido. El volumen de material de relleno removido fue estimado en base al área superficial de la excavación (3.5 m x 6.5 m) y a la profundidad de la excavación (3.9 m). El volumen de relleno fue convertido en masa de relleno removida utilizando un valor de densidad tabulado de 1,734 Kg/m³, y esta masa removida fue multiplicada por la concentración promedio de TPH en el material, para obtener la masa de TPH recuperada durante la operación de excavación y desincorporación del tanque.

$$\text{Masa de TPH recuperada (mg)} = \text{Volumen de relleno excavado (m}^3\text{)} \times \text{Densidad del material (Kg/m}^3\text{)} \times \text{Concentración promedio de TPH (mg/kg)}$$

Finalmente, la masa de TPH recuperada fue dividida por la densidad de la gasolina (0.73 Kg/L) para obtener el volumen equivalente de gasolina recuperado durante la operación de excavación y desincorporación del tanque, el cual resultó en **82.00 litros** **Tabla 12**. En la **Tabla 15** se presenta un resumen de estos cálculos.

TABLA 15 MASA DE GASOLINA RECUPERADA DURANTE LA EXCAVACIÓN Y DESINCORPORACIÓN DEL TANQUE SUBTERRÁNEO⁽¹⁾

Dimensiones de la Fosa (m)							
Longitud	Ancho	Profundidad	Volumen Excavado (m ³)	Densidad del Suelo ⁽²⁾ (Kg/m ³)	Masa de Suelo Excavada ⁽³⁾ (Kg)	Concentración Promedio de TPH ⁽⁴⁾ (mg/Kg)	Masa de Gasolina Recuperada ⁽⁵⁾ (Kg)
6.5	3.5	3.9	88.725	1,734	153,849	393	60

NOTAS:

- (1) Información analítica recabada durante una investigación preliminar realizada en Febrero de 2000.
- (2) Valor tabulado para arcilla compacta de 108 lb/ft³. Fuente: Das, Braja, Principles of Geotechnical Engineering, Tirad Edition, PWS Publishing, 1994.
- (3) Masa de suelo de relleno = volumen de relleno excavado * densidad.
- (4) Los resultados analíticos de dos muestras captadas por debajo del fondo del tanque fueron promediados para obtener una concentración de TPH representativa para todo el material excavado.
- (5) Masa de gasolina recuperada = Masa de relleno excavada * Concentración promedio de TPH.



Volumen de gasolina recuperado por los Sistemas de Extracción de Vapores del Suelo.

El volumen de gasolina o hidrocarburos de gasolina recuperados por los sistemas de extracción de vapores del suelo, SVE 1 y SVE2 (SVE, Soil Vapor Extraction), entre el arranque de las operaciones en Agosto de 2001 y Mayo de 2002 fue determinado utilizando los resultados analíticos de las muestras de chimenea captadas luego del arranque de los sistemas, las lecturas de vapores orgánicos realizadas con un detector de fotoionización (PID, Photoionization detector), y los parámetros operacionales de los sistemas. Las muestras de chimenea captadas fueron sometidas a análisis de BTEX, y los resultados analíticos fueron sumados y convertidos en una concentración estimada de hidrocarburos de petróleo rango gasolina (TPH-G, Total Petroleum Hydrocarbons- Gasoline) utilizando un factor de conversión de 4.66. Este factor de conversión fue derivado dividiendo la composición total de la gasolina (100%) entre la composición porcentual promedio de BTEX en gasolina (21.45%), utilizando datos tomados del TPH Criteria Work Group (1997 y 1998). La conversión de BTEX total a TPH-G utilizada en esta estimación, considera que la fracción en fase vapor de BTEX presente en el subsuelo de la Planta corresponde al porcentaje en peso de BTEX en gasolina pura. Debido a que los componentes de BTEX representan el rango de carbonos inferior a medio de la gasolina, los métodos utilizados en este estimado pueden resultar en una ligera sobre-estimación del volumen real de hidrocarburos de gasolina recuperado.

La concentración estimada de TPH-G fue dividida entre las mediciones tomadas con el PID al momento de captar la muestra que fue analizada en el laboratorio, para obtener un factor de conversión que permita relacionar las mediciones del PID con la concentración estimada de TPH-G.

$$\text{Factor de conversión} = \text{Concentración estimada de TPH-G (mg/m}^3\text{)} / \text{Medición del PID (ppm)}$$

Este factor de conversión fue entonces utilizado para calcular la masa de hidrocarburos de gasolina removido, aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Masa de Hidrocarburos de Gasolina Recuperados por los Sistemas SVE} = \text{Medición del PID (ppm)} \times \text{Factor para convertir la medición del PID a concentración de TPH-G (mg/m}^3\text{)} \times \text{Tasa de flujo del sistema (m}^3\text{/hora)} \times \text{Tiempo de operación del sistema durante el período evaluado (horas)}$$

Finalmente, la masa de hidrocarburos de gasolina recuperada fue dividida por la densidad de la gasolina (0.73 Kg/L) para obtener el volumen equivalente de gasolina recuperada. Estos cálculos indican que, entre Agosto de 2001 y Mayo de 2002 se ha recuperado aproximadamente **70.00 litros** de gasolina mediante la operación de los sistemas SVE. Los resultados analíticos de las muestras captadas en los sistemas SVE y los factores de conversión se presentan en la **Tabla 16** y el cálculo del volumen de hidrocarburos de gasolina recuperado por los sistemas SVE se presenta en la **Tabla 17**.



TABLA 16 RESUMEN DE RESULTADOS ANALÍTICOS DE MUESTRAS DE LOS SISTEMAS SVE Y FACTORES DE CONVERSIÓN A TPH-G DE LAS LECTURAS DEL PID

Identificación de la muestra	Fecha	Benceno (mg/m ³)	Tolueno (mg/m ³)	etilbenceno (mg/m ³)	Xileno (mg/m ³)	Total BTEX (mg/m ³)	Composición porcentual promedio de BTEX en gasolina ⁽¹⁾	Factor de conversión a gasolina ⁽²⁾	Concentración aproximada de TPH-G ⁽³⁾ (mg/m ³)	Lectura de PID (ppm)	Factor de conversión para lecturas del PID ⁽⁴⁾
SVE 1	21-8-01	6	8	6	12	32.0	21.45%	4.66	149.12	548.0	0.27
SVE 2	21-8-01	ND	6	6	12	24.0	21.45%	4.66	111.84	327.0	0.34

NOTA:

- (1) Valor tabulado. Fuente: Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Volume 3: Selection of Representative TPH Fractions Based on Fate and Transport Considerations, Amherst Scientific Publishers, 1997.
- (2) Factor de conversión = Composición porcentual de gasolina pura (100%) Composición porcentual promedio de BTEX en gasolina (21.45%)
- (3) Concentración aproximada de TPH-G = Concentración Total BTEX * Factor de conversión a gasolina.
- (4) Factor de conversión para lecturas del PID = Concentración aproximada de TPH-G / Lectura del PID tomada en campo.

PID = Detector de Fotoionización.

TPH-G = Hidrocarburos Totales de Petróleo rango gasolina.



TABLA 17 VOLUMEN ESTIMADO DE GASOLINA RECUPERADO POR LOS SISTEMAS SVE

SVE 1								SVE 2				
Fecha	Horas acumuladas	No. de días	Tasa de flujo promedio de vapor ⁽¹⁾ (m ³ /hr)	Lecturas del PID ⁽²⁾ (ppm)	Factor de conversión para las lecturas del PID ⁽³⁾	Masa removida durante el periodo ⁽⁴⁾ (kg)	Volumen removido durante el periodo ⁽⁴⁾ (lt)	Flujo promedio de vapor ⁽¹⁾ (m ³ /hr)	Lecturas del PID ⁽²⁾ (ppm)	Factor de conversión para las lecturas del PID ⁽³⁾	Masa removida durante el periodo ⁽⁴⁾ (kg)	Volumen removido durante el periodo ⁽⁴⁾ (lt)
21-8-01	0	0.0	280.33	548	0.27	0.00	0.00	206.74	327	0.34	0.00	0.00
22-8-01	16	0.7	280.33	486	0.27	0.59	0.81	206.74	527	0.34	0.59	0.81
22-8-01	24	1.0	280.33	536	0.27	0.32	0.44	206.74	530	0.34	0.30	0.41
23-8-01	40	1.7	280.33	554	0.27	0.67	0.92	206.74	414	0.34	0.47	0.64
23-8-01	48	2.0	280.33	572	0.27	0.35	0.47	206.74	410	0.34	0.23	0.32
24-8-01	64	2.7	280.33	670	0.27	0.81	1.11	206.74	493	0.34	0.55	0.76
24-8-01	72	3.0	280.33	552	0.27	0.33	0.46	206.74	455	0.34	0.26	0.35
25-8-01	88	3.7	280.33	579	0.27	0.70	0.96	206.74	423	0.34	0.48	0.65
25-8-01	96	4.0	280.33	625	0.27	0.38	0.52	206.74	277	0.34	0.16	0.21
27-8-01	136	5.7	280.33	624	0.27	1.89	2.59	206.74	573	0.34	1.61	2.21
27-8-01	144	6.0	280.33	590	0.27	0.36	0.49	206.74	576	0.34	0.32	0.44
28-8-01	160	6.7	280.33	580	0.27	0.70	0.96	206.74	479	0.34	0.54	0.74
28-8-01	168	7.0	280.33	630	0.27	0.38	0.52	206.74	620	0.34	0.35	0.48
29-8-01	184	7.7	280.33	680	0.27	0.82	1.13	206.74	431	0.34	0.48	0.66
29-8-01	192	8.0	280.33	650	0.27	0.39	0.54	206.74	444	0.34	0.25	0.34



30-8-01	208	8.7	280.33	640	0.27	0.78	1.06	206.74	367	0.34	0.41	0.57
30-8-01	216	9.0	280.33	620	0.27	0.38	0.51	206.74	312	0.34	0.18	0.24
1-9-01	256	10.7	280.33	766	0.27	2.32	3.18	206.74	315	0.34	0.89	1.21
1-9-01	264	11.0	280.33	426	0.27	0.26	0.35	206.74	317	0.34	0.18	0.24
2-9-01	280	11.7	280.33	483	0.27	0.58	0.80	206.74	280	0.34	0.31	0.43
2-9-01	288	12.0	280.33	475	0.27	0.29	0.39	206.74	278	0.34	0.16	0.21
3-9-01	304	12.7	280.33	480	0.27	0.58	0.80	206.74	265	0.34	0.30	0.41
3-9-01	312	13.0	280.33	499	0.27	0.30	0.41	206.74	275	0.34	0.15	0.21
4-9-01	328	13.7	280.33	589	0.27	0.71	0.98	206.74	289	0.34	0.33	0.45
4-9-01	336	14.0	280.33	583	0.27	0.35	0.48	206.74	272	0.34	0.15	0.21
5-9-01	352	14.7	280.33	594	0.27	0.72	0.99	206.74	257	0.34	0.29	0.40
5-9-01	360	15.0	280.33	458	0.27	0.28	0.38	206.74	182	0.34	0.10	0.14
6-9-01	376	15.7	280.33	555	0.27	0.67	0.92	206.74	249	0.34	0.28	0.38
6-9-01	384	16.0	280.33	347	0.27	0.21	0.29	206.74	239	0.34	0.13	0.18
7-9-01	400	16.7	280.33	415	0.27	0.50	0.69	206.74	242	0.34	0.27	0.37
7-9-01	408	17.0	280.33	384	0.27	0.23	0.32	206.74	191	0.34	0.11	0.15
8-9-01	424	17.7	280.33	578	0.27	0.70	0.96	206.74	239	0.34	0.27	0.37
9-9-01	448	18.7	280.33	538	0.27	0.98	1.34	206.74	215	0.34	0.36	0.50
9-9-01	456	19.0	280.33	404	0.27	0.24	0.34	206.74	210	0.34	0.12	0.16
10-9-01	472	19.7	280.33	449	0.27	0.54	0.74	206.74	159	0.34	0.18	0.24
10-9-01	480	20.0	280.33	335	0.27	0.20	0.28	206.74	126	0.34	0.07	0.10
11-9-01	496	20.7	280.33	389	0.27	0.47	0.65	206.74	94	0.34	0.11	0.14
12-9-01	528	22.0	280.33	239	0.27	0.58	0.79	206.74	33	0.34	0.07	0.10
13-9-01	544	22.7	280.33	343	0.27	0.42	0.57	206.74	33	0.34	0.04	0.05
13-9-01	552	23.0	280.33	264	0.27	0.16	0.22	206.74	15	0.34	0.01	0.01
14-9-01	568	23.7	280.33	299	0.27	0.36	0.50	206.74	30	0.34	0.03	0.05



14-9-01	576	24.0	280.33	226	0.27	0.14	0.19	206.74	30	0.34	0.02	0.02
15-9-01	592	24.7	280.33	398	0.27	0.48	0.66	206.74	29	0.34	0.03	0.04
15-9-01	600	25.0	280.33	214	0.27	0.13	0.18	206.74	19	0.34	0.01	0.01
16-9-01	616	25.7	280.33	294	0.27	0.36	0.49	206.74	11	0.34	0.01	0.02
17-9-01	640	26.7	280.33	86	0.27	0.16	0.21	206.74	6	0.34	0.01	0.01
17-9-01	648	27.0	280.33	132	0.27	0.08	0.11	206.74	9	0.34	0.01	0.01
18-9-01	664	27.7	280.33	292	0.27	0.35	0.48	206.74	8	0.34	0.01	0.01
18-9-01	672	28.0	280.33	144	0.27	0.09	0.12	206.74	10	0.34	0.01	0.01
19-9-01	688	28.7	280.33	229	0.27	0.28	0.38	206.74	8	0.34	0.01	0.01
19-9-01	696	29.0	280.33	189	0.27	0.11	0.16	206.74	18	0.34	0.01	0.01
20-9-01	712	29.7	280.33	239	0.27	0.29	0.40	206.74	8	0.34	0.01	0.01
20-9-01	720	30.0	280.33	175	0.27	0.11	0.15	206.74	8	0.34	0.00	0.01
21-9-01	736	30.7	280.33	170	0.27	0.21	0.28	206.74	8	0.34	0.01	0.01
21-9-01	744	31.0	280.33	175	0.27	0.11	0.15	206.74	8	0.34	0.00	0.01
22-9-01	760	31.7	280.33	219	0.27	0.27	0.36	206.74	7	0.34	0.01	0.01
22-9-01	768	32.0	280.33	200	0.27	0.12	0.17	206.74	7	0.34	0.00	0.01
24-9-01	800	33.3	280.33	80	0.27	0.19	0.27	206.74	7	0.34	0.02	0.02
24-9-01	808	33.7	280.33	70	0.27	0.04	0.06	206.74	7	0.34	0.00	0.01
25-9-01	824	34.3	280.33	73	0.27	0.09	0.12	206.74	6	0.34	0.01	0.01
25-9-01	832	34.7	280.33	75	0.27	0.05	0.06	206.74	6	0.34	0.00	0.00
26-9-01	848	35.3	280.33	62	0.27	0.08	0.10	206.74	6	0.34	0.01	0.01
26-9-01	856	35.7	280.33	49	0.27	0.03	0.04	206.74	7	0.34	0.00	0.01
27-9-01	872	36.3	280.33	55	0.27	0.07	0.09	206.74	7	0.34	0.01	0.01
27-9-01	880	36.7	280.33	60	0.27	0.04	0.05	206.74	7	0.34	0.00	0.01
28-9-01	896	37.3	280.33	126	0.27	0.15	0.21	206.74	6	0.34	0.01	0.01
28-9-01	904	37.7	280.33	86	0.27	0.05	0.07	206.74	12	0.34	0.01	0.01



29-9-01	920	38.3	280.33	58	0.27	0.07	0.10	206.74	9	0.34	0.01	0.01
1-10-01	968	40.3	280.33	77	0.27	0.28	0.38	206.74	13	0.34	0.04	0.06
1-10-01	976	40.7	280.33	60	0.27	0.04	0.05	206.74	13	0.34	0.01	0.01
2-10-01	992	41.3	280.33	67	0.27	0.08	0.11	206.74	7	0.34	0.01	0.01
2-10-01	1000	41.7	280.33	134	0.27	0.08	0.11	206.74	11	0.34	0.01	0.01
3-10-01	1016	42.3	280.33	141	0.27	0.17	0.23	206.74	6	0.34	0.01	0.01
3-10-01	1024	42.7	280.33	142	0.27	0.09	0.12	206.74	9	0.34	0.01	0.01
4-10-01	1040	43.3	280.33	130	0.27	0.16	0.22	206.74	7	0.34	0.01	0.01
4-10-01	1048	43.7	280.33	133	0.27	0.08	0.11	206.74	9	0.34	0.01	0.01
5-10-01	1064	44.3	280.33	70	0.27	0.08	0.12	206.74	7	0.34	0.01	0.01
5-10-01	1072	44.7	280.33	65	0.27	0.04	0.05	206.74	8	0.34	0.00	0.01
6-10-01	1088	45.3	280.33	188	0.27	0.23	0.31	206.74	9	0.34	0.01	0.01
6-10-01	1096	45.7	280.33	122	0.27	0.07	0.10	206.74	5	0.34	0.00	0.00
8-10-01	1128	47.0	280.33	42	0.27	0.10	0.14	206.74	2	0.34	0.00	0.01
8-10-01	1136	47.3	280.33	37	0.27	0.02	0.03	206.74	2	0.34	0.00	0.00
9-10-01	1152	48.0	280.33	31	0.27	0.04	0.05	206.74	1	0.34	0.00	0.00
9-10-01	1160	48.3	280.33	30	0.27	0.02	0.02	206.74	3	0.34	0.00	0.00
10-10-01	1176	49.0	280.33	41	0.27	0.05	0.07	206.74	1	0.34	0.00	0.00
10-10-01	1184	49.3	280.33	37	0.27	0.02	0.03	206.74	2	0.34	0.00	0.00
11-10-01	1200	50.0	280.33	148	0.27	0.18	0.25	206.74	6	0.34	0.01	0.01
11-10-01	1208	50.3	280.33	123	0.27	0.07	0.10	206.74	4	0.34	0.00	0.00
12-10-01	1224	51.0	280.33	122	0.27	0.15	0.20	206.74	3	0.34	0.00	0.00
12-10-01	1232	51.3	280.33	119	0.27	0.07	0.10	206.74	3	0.34	0.00	0.00
13-10-01	1248	52.0	280.33	241	0.27	0.29	0.40	206.74	7	0.34	0.01	0.01
13-10-01	1256	52.3	280.33	183	0.27	0.11	0.15	206.74	4	0.34	0.00	0.00
14-10-01	1272	53.0	280.33	101	0.27	0.12	0.17	206.74	7	0.34	0.01	0.01



14-10-01	1280	53.3	280.33	155	0.27	0.09	0.13	206.74	7	0.34	0.00	0.01
15-10-01	1296	54.0	280.33	119	0.27	0.14	0.20	206.74	7	0.34	0.01	0.01
15-10-01	1304	54.3	280.33	66	0.27	0.04	0.05	206.74	3	0.34	0.00	0.00
16-10-01	1320	55.0	280.33	95	0.27	0.12	0.16	206.74	7	0.34	0.01	0.01
16-10-01	1328	55.3	280.33	93	0.27	0.06	0.08	206.74	7	0.34	0.00	0.01
17-10-01	1344	56.0	280.33	157	0.27	0.19	0.26	206.74	7	0.34	0.01	0.01
17-10-01	1352	56.3	280.33	157	0.27	0.10	0.13	206.74	7	0.34	0.00	0.01
18-10-01	1368	57.0	280.33	165	0.27	0.20	0.27	206.74	5	0.34	0.01	0.01
18-10-01	1376	57.3	280.33	170	0.27	0.10	0.14	206.74	7	0.34	0.00	0.01
28-3-02	0	0.0	280.33	0	0.27	0.00	0.00	206.74	11	0.34	0.00	0.00
28-3-02	8	0.3	280.33	105	0.27	0.06	0.09	206.74	4	0.34	0.00	0.00
29-3-02	24	1.0	280.33	98	0.27	0.12	0.16	206.74	14	0.34	0.02	0.02
29-3-02	32	1.3	280.33	120	0.27	0.07	0.10	206.74	9	0.34	0.01	0.01
30-3-02	48	2.0	280.33	114	0.27	0.14	0.19	206.74	14	0.34	0.02	0.02
30-3-02	56	2.3	280.33	108	0.27	0.07	0.09	206.74	12	0.34	0.01	0.01
1-4-02	96	4.0	280.33	94	0.27	0.28	0.39	206.74	11	0.34	0.03	0.04
2-4-02	120	5.0	280.33	103	0.27	0.19	0.26	206.74	7	0.34	0.01	0.02
4-4-02	168	7.0	280.33	123	0.27	0.45	0.61	206.74	7	0.34	0.02	0.03
5-4-02	192	8.0	280.33	133	0.27	0.24	0.33	206.74	12	0.34	0.02	0.03
6-4-02	216	9.0	280.33	102	0.27	0.19	0.25	206.74	8	0.34	0.01	0.02
8-4-02	264	11.0	280.33	55	0.27	0.20	0.27	206.74	2	0.34	0.01	0.01
9-4-02	288	12.0	280.33	17	0.27	0.03	0.04	206.74	5	0.34	0.01	0.01
10-4-02	312	13.0	280.33	41	0.27	0.07	0.10	206.74	17	0.34	0.03	0.04
11-4-02	336	14.0	280.33	58	0.27	0.11	0.14	206.74	21	0.34	0.04	0.05
12-4-02	360	15.0	280.33	74	0.27	0.13	0.18	206.74	9	0.34	0.02	0.02



13-4-02	384	16.0	280.33	114	0.27	0.21	0.28	206.74	15	0.34	0.03	0.03
15-4-02	432	18.0	280.33	15	0.27	0.05	0.07	206.74	7	0.34	0.02	0.03
16-4-02	456	19.0	280.33	58	0.27	0.11	0.14	206.74	16	0.34	0.03	0.04
17-4-02	480	20.0	280.33	51	0.27	0.09	0.13	206.74	14	0.34	0.02	0.03
18-4-02	504	21.0	280.33	109	0.27	0.20	0.27	206.74	16	0.34	0.03	0.04
19-4-02	528	22.0	280.33	110	0.27	0.20	0.27	206.74	16	0.34	0.03	0.04
20-4-02	552	23.0	280.33	112	0.27	0.20	0.28	206.74	23	0.34	0.04	0.05
22-4-02	576	24.0	280.33	112	0.27	0.20	0.28	206.74	22	0.34	0.04	0.05
23-4-02	600	25.0	280.33	110	0.27	0.20	0.27	206.74	20	0.34	0.03	0.05
24-4-02	624	26.0	280.33	113	0.27	0.21	0.28	206.74	22	0.34	0.04	0.05
25-4-02	648	27.0	280.33	125	0.27	0.23	0.31	206.74	21	0.34	0.04	0.05
26-4-02	672	28.0	280.33	123	0.27	0.22	0.31	206.74	21	0.34	0.04	0.05
27-4-02	696	29.0	280.33	124	0.27	0.23	0.31	206.74	20	0.34	0.03	0.05
29-4-02	720	30.0	280.33	120	0.27	0.22	0.30	206.74	23	0.34	0.04	0.05
30-4-02	744	31.0	280.33	122	0.27	0.22	0.30	206.74	21	0.34	0.04	0.05
2-5-02	768	32.0	280.33	142	0.27	0.26	0.35	206.74	21	0.34	0.04	0.05
3-5-02	792	33.0	280.33	97	0.27	0.18	0.24	206.74	20	0.34	0.03	0.05
4-5-02	816	34.0	280.33	99	0.27	0.18	0.25	206.74	20	0.34	0.03	0.05
6-5-02	864	36.0	280.33	129	0.27	0.47	0.64	206.74	20	0.34	0.07	0.09
7-5-02	888	37.0	280.33	134	0.27	0.24	0.33	206.74	20	0.34	0.03	0.05
8-5-02	912	38.0	280.33	132	0.27	0.24	0.33	206.74	20	0.34	0.03	0.05
9-5-02	936	39.0	280.33	139	0.27	0.25	0.35	206.74	31	0.34	0.05	0.07
10-5-02	960	40.0	280.33	134	0.27	0.24	0.33	206.74	20	0.34	0.03	0.05
11-5-02	984	41.0	280.33	142	0.27	0.26	0.35	206.74	35	0.34	0.06	0.08
TOTALES		37.79	51.73					TOTALES	13.66	18.67		

MASA REMOVIDA DURANTE EL PERIODO (Kg) = 37.79 + 13.66 = 51.45



NOTAS:

- (1) Tasa de flujo medida el 21 de Agosto de 2001.
 - (2) Lecturas del PID tomadas en campo.
 - (3) El factor de conversión fue calculado para convertir las lecturas del PID en concentraciones de TPH-G (ppm). Para calcular el factor de conversión, primero se multiplico el resultado analítico de BTEX total obtenido para las muestras captadas al 21 de Agosto de 2001 para un factor de 4.66 para obtener una concentración aproximada de TPH-G, y luego se dividió la concentración aproximada de TPH-G entre la lectura del PID tomada al momento de captar la muestra que fue analizada en el laboratorio.
- La masa de gasolina recuperada en fase de vapor fue calculada convirtiendo las lecturas del PID (ppm) a masa por volumen y luego multiplicando este valor por la tasa de flujo promedio y el tiempo de extracción



ANÁLISIS DEL VOLUMEN DE GASOLINA RESTANTE.

Debido a que el volumen de gasolina recuperada mediante las acciones de remediación es menor al volumen de gasolina que se estima se fugó accidentalmente al ambiente, en esta sección se incluye un análisis de las condiciones en las cuales el volumen restante de gasolina, o de hidrocarburos de gasolina, estaría presente en el subsuelo de la Planta. El análisis explora tres escenarios:

1. Reducción del volumen de material fugado debido a volatilización.

La volatilización es el proceso por medio del cual líquidos y sólidos escapan a la atmósfera. El proceso tiene dos componentes principales: escape de la interfase líquido (sólido) / aire y dispersión. El escape de la interfase depende de la advección (movimiento de masas de aire en sentido horizontal) y la turbulencia. Así, los compuestos más volátiles de la gasolina tienden a pasar rápidamente a la fase de vapor al ser expuestos a la atmósfera. La gasolina se volatilizará en un espacio abierto hasta que se alcance un equilibrio entre saturación y volatilización. La volatilización puede ser responsable de una gran pérdida de masa si la gasolina está en superficie, especialmente en condiciones de fuerte viento y altas temperaturas. Es de esperar que en la Planta haya ocurrido volatilización de gasolina a través del registro del tanque subterráneo durante las labores de llenado de tanques de los vehículos, luego de ocurrir la ruptura de la manguera de transferencia, y que haya ocurrido dentro de los pozos perforados en áreas donde el agua subterránea fue impactada por material tanto en fase disuelta como en fase libre.

2. Reducción del volumen de material fugado debido a biodegradación.

La biodegradación se entiende como la transformación biológica o destrucción de contaminantes por la acción de microbios nativos del subsuelo. La degradación biológica de hidrocarburos de petróleo, incluyendo BTEX, ha sido ampliamente documentada en áreas relacionadas con la producción y almacenaje de combustibles de petróleo (EPA 1997), y el resultado es la conversión de los compuestos de hidrocarburos en productos finales, no tóxicos, como alcoholes, ésteres, dióxido de carbono, agua y biomasa bacterial. La biodegradación se describe usualmente utilizando una constante de degradación de primer grado (ASTM, Standard Guide for Remediation of Ground Water by Natural Attenuation at Petroleum Release Sites, American Society for Testing and Materials, 1998). Los valores publicados para constantes de degradación de BTEX de primer grado varían entre 0.001 días^{-1} y 0.003 días^{-1} (Buscheck, et. al. 1993 y Weidemeir et al. 1995). Con base en esta información, cabe esperar que en la Planta este ocurriendo biodegradación y que este proceso esté reduciendo el volumen de gasolina fugado al subsuelo.

3. Saturación Residual.

En condiciones de saturación residual, los hidrocarburos de petróleo son inmovilizados por las fuerzas capilares en los espacios porosos o en fracturas y no son fácilmente removidos mediante el uso de las tecnologías disponibles actualmente (EPA, 1995). La Saturación Residual describe una condición en la cual los hidrocarburos se encuentran esencialmente inmóviles en el subsuelo. La USEPA describe esta condición de la siguiente manera:

“ El nivel de saturación en el cual un líquido continuo no acuoso (NAPL) se hace discontinuo y es inmovilizado por fuerzas capilares es conocido como saturación residual. La saturación residual de líquidos livianos no acuosos, en este grupo se ubica la gasolina (LNAPL), está fuertemente retenida en los espacios porosos y no es fácilmente removida utilizando las tecnologías de remediación existentes. ”

Para evaluar la posibilidad de que el volumen restante de gasolina esté presente en condiciones de saturación residual, la información recabada en la Planta durante las investigaciones realizadas fue utilizada para evaluar si la diferencia entre el volumen estimado de gasolina que se fugó al ambiente y el volumen recuperado podría estar aún presente en el subsuelo del área donde originalmente se detectó material en fase libre. Cabe esperar que la fracción móvil de hidrocarburos de gasolina fue removida mediante el achiقة manual de pozos y la operación del sistema de remediación, y que la fracción inmóvil o saturación residual, esté aún unida al material del suelo. La saturación residual de hidrocarburos de petróleo varía, aproximadamente, entre 10% y 20% del volumen total de poros en la zona no saturada del suelo, y



aproximadamente entre 15% y 50% del volumen total de poros en la zona saturada del suelo (EPA 1995). Estos rangos de saturación residual fueron usados junto con información recabada en la Planta para evaluar la posibilidad de que el volumen restante de gasolina esté presente en el subsuelo de la Planta en niveles de saturación residual.

Esta evaluación está basada en suposiciones con respecto a la extensión superficial de la pluma de material en fase libre antes de comenzar las acciones de extracción de agua subterránea, con la finalidad de acotar la cantidad de hidrocarburos que puede permanecer en saturación residual. El espesor de la zona que podría contener hidrocarburos en saturación residual fue variado entre 0.03 m y 0.12 m y la saturación residual fue variada utilizando valores tabulados para evaluar si el volumen fugado restante podía estar presente en condiciones de saturación residual.

En la evaluación se utilizó una porosidad de 30% para el acuífero, la cual fue estimada por el modelo de flujo y transporte de agua subterránea desarrollado para la Planta; la extensión superficial estimada de la pluma de hidrocarburos en fase libre presente antes del arranque del sistema de remediación **Figura 2**, y un valor estimado del espesor de la pluma de hidrocarburos en fase libre presente antes del arranque del sistema de remediación. La siguiente ecuación fue utilizada para estimar el volumen de gasolina que puede estar presente en niveles de saturación residual:

$$\text{Volumen de Gasolina en Saturación Residual} = \text{Extensión superficial de la pluma de hidrocarburos en fase libre (m}^2\text{)} \times \text{Espesor del acuífero que contiene hidrocarburos en saturación residual (m)} \times \text{Porosidad del acuífero (\%)} \times \text{Volumen de poros que contiene hidrocarburos en saturación residual (\%)}$$

Debido a la complejidad de la hidrogeología del área donde se ubica la Planta, se utilizó una gama de valores para representar tanto el espesor del acuífero que puede contener hidrocarburos en saturación residual. Los resultados de estos cálculos fueron evaluados para determinar si es posible que la diferencia entre el volumen de gasolina fugado y el volumen de gasolina recuperado esté presente en el subsuelo de la Planta en un nivel de saturación residual, dentro de unos rangos lógicos. Los cálculos de saturación residual presentados en la **Tabla 18** indican que si la superficie de la pluma de material en fase libre es de 7.870 m² y tiene una capa de hidrocarburos en saturación residual ocupando entre 10% a 20% del espacio de poros, y cuyo espesor varía entre 0.03 m y 0.12 m, entonces el volumen de gasolina presente en el subsuelo en condiciones de saturación residual puede variar entre 7.08 m³ y 56.66 m³. Este rango de volúmenes incluye el volumen faltante (diferencia entre el volumen de gasolina fugado y el volumen recuperado por las operaciones de remediación implementadas).



Figura 2. Extensión superficial estimada de la pluma de hidrocarburos en fase libre presente antes del arranque del sistema de remediación.

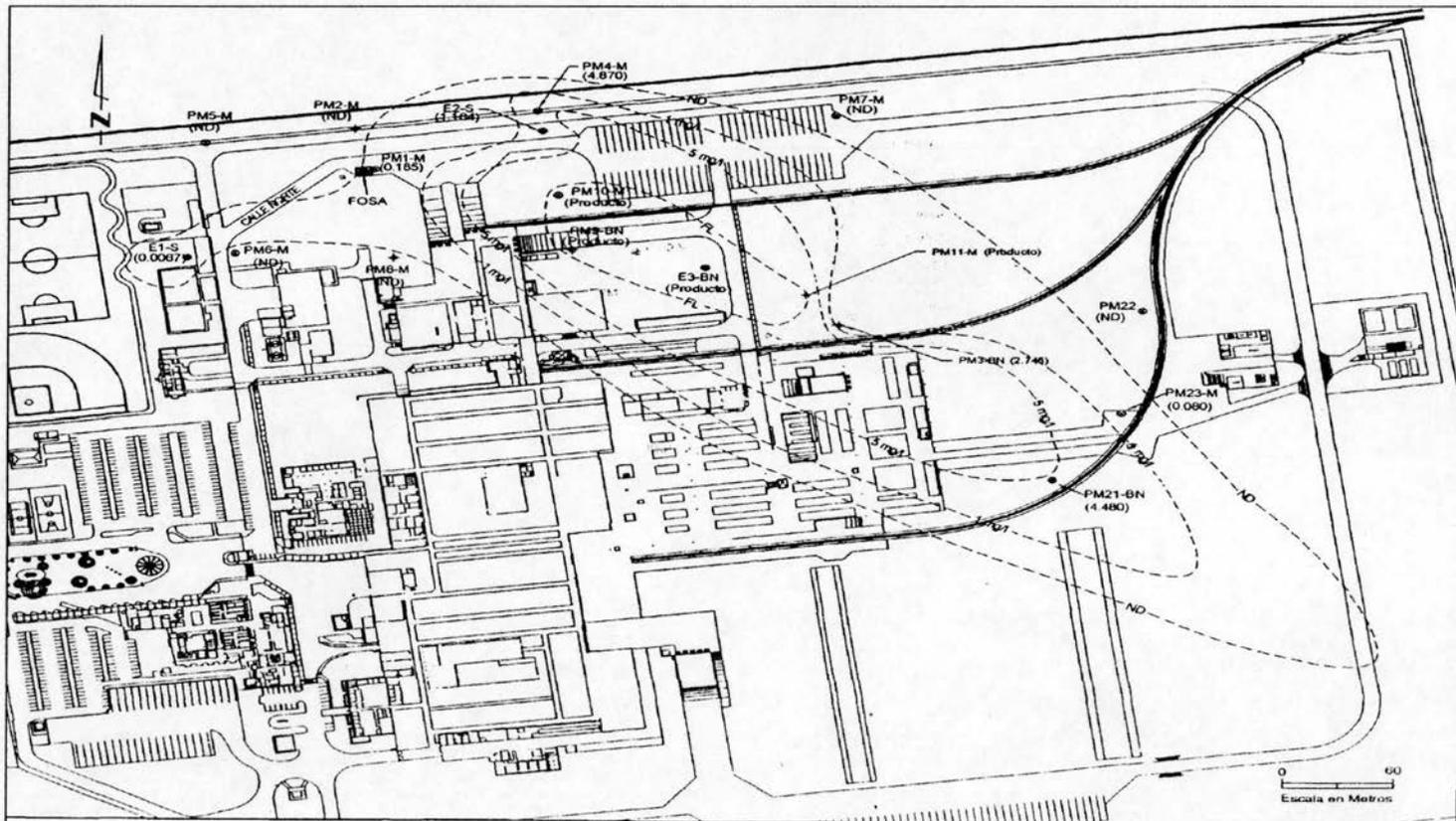


TABLA 18 VOLUMEN ESTIMADO DE GASOLINA QUE PERMANECE EN CONDICIONES DE SATURACIÓN RESIDUAL ⁽¹⁾

Área impactada por material en fase libre ⁽²⁾	Espesor estimado de material en fase libre ⁽³⁾	Porosidad del acuífero ⁽⁴⁾	Volumen de poros que contiene material en fase libre en saturación residual ⁽⁵⁾	Porcentaje de la porosidad total que contiene material en fase libre en saturación residual ⁽⁶⁾	Espesor equivalente que contiene material en fase libre en saturación residual ⁽⁷⁾	Volumen de gasolina presente en saturación residual ⁽⁸⁾
(m ²)	(m)	(%)	(%)	(%)	(m)	(m ³)
7.870	0.03	30%	10%	3%	0.0009	7.08
7.870	0.03	30%	20%	6%	0.0018	14.17
7.870	0.03	30%	30%	9%	0.0027	21.25
7.870	0.03	30%	40%	12%	0.0036	28.33
7.870	0.03	30%	50%	15%	0.0045	35.42
7.870	0.06	30%	10%	3%	0.0018	14.17
7.870	0.06	30%	20%	6%	0.0036	28.33
7.870	0.06	30%	30%	9%	0.0054	42.50
7.870	0.06	30%	40%	12%	0.0072	56.66
7.870	0.06	30%	50%	15%	0.0090	70.83
7.870	0.09	30%	10%	3%	0.0027	21.25
7.870	0.09	30%	20%	6%	0.0054	42.50
7.870	0.09	30%	30%	9%	0.0081	63.75
7.870	0.09	30%	40%	12%	0.0108	85.00



7.870	0.09	30%	50%	15%	0.0135	106.25
7.870	0.12	30%	10%	3%	0.0036	28.33
7.870	0.12	30%	20%	6%	0.0072	56.66
7.870	0.12	30%	30%	9%	0.0108	85.00
7.870	0.12	30%	40%	12%	0.0144	113.33
7.870	0.12	30%	50%	15%	0.018	141.66

NOTAS:

- (1) Estos datos fueron calculados para evaluar si es factible que la diferencia estimada entre el volumen de gasolina fugado y el recuperado este presente en el subsuelo en condiciones de Saturación Residual.
- (2) Basado en el área superficial de la zona con hidrocarburos en fase libre presentado en la Figura 1.
- (3) Rangos de valores estimados con el propósito de realizar la evaluación. El espesor de material en fase libre varió entre 1.25" y 1.5 ft en el pozo E-3.
- (4) El valor de porosidad del acuífero fue tomado del Modelo de Flujo y Transporte preparado para la Planta en Octubre de 2000.
- (5) Rango de valores tabulados. Fuente: Newell, Charles, Acree, Steven, Ross, Randall, y Huling, Escott, E.U. EPA Ground Water Issue EPA/540/S-95/500, Light Nonaqueous Phase Liquids, 1995.
- (6) Porcentaje de la porosidad total que contiene material en fase libre en Saturación Residual = Porosidad del acuífero (30%) * volumen de poros que contiene material en fase libre en Saturación Residual (%).
- (7) Espesor equivalente que contiene material en fase libre en Saturación Residual = Porcentaje de la porosidad total que contiene material en fase libre en Saturación Residual * Espesor estimado de material en fase libre.
- (8) Volumen de gasolina presente en Saturación Residual = Espesor equivalente que contiene material en fase libre en Saturación Residual * Área impactada por material en fase libre.

**COSTOS APROXIMADOS DE MATERIALES, EQUIPO Y LABORATORIO PARA LA REMEDIACIÓN.**

CONCEPTO	PESOS
Análisis de muestras	135.604.61
Perforaciones en suelo natural para muestreo y análisis	222.221.52
Prueba de hermeticidad en tanque de gasolina y diesel	10.735.37
Levantamientos topográficos	26.529.94
Toma de video grabación sumergida	5.552.78
Bomba sumergible	18.470.65
Perforación de Pozos	1.425.619.11
2 motobombas de 10 HP de 3600 RPM de 3" x 3"	31.050.00
Material para bombeo de pozos, tubería y aditamentos	500.768.68
Colocación de ademe a 13 pozos de recuperación	32.740.50
Zanjas para pozo 3 y 9	147.295.44
Pavimentación a área de pozos de recuperación	430.442.39
Material de laboratorio	6.354.84
Cerca en área de remediación	40.690.77
Instalación neumática y eléctrica	367.562.52
Arreglo de tubería de 4" descarga bombas de las cisternas 1 y 2	13.106.88
Trabajos de limpieza en pozo 3	11.304.40
Obras civiles en la columna de separación	18.866.00
Análisis de laboratorio	6.760.97
Reconversión de bombas	4.533.11
Obras de reforzamiento estructural en la base de la columna de separación	17.089.21
Consultaría	2.398.263.70
INVERSIÓN TOTAL PESOS	5,871,563.39



CONCLUSIONES.

LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS ES UN CAMPO DE ESTUDIO Y TRABAJO PARA EL INGENIERO CIVIL POR SU CONOCIMIENTO A CERCA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS, DEL SUELO Y DEL AGUA, OBTENIDO A TRAVÉS DE LAS MATERIAS QUE INTEGRAN SU PERFIL COMO SON: TOPOGRAFÍA, HIDRÁULICA, HIDROLOGÍA, GEOLOGÍA, COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS, MECÁNICA DE SUELOS Y GEOHIDROLOGÍA.

TODA LA INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA DESARROLLADA TIENE LA FINALIDAD DE DETERMINAR EL MEJOR MÉTODO DE REMEDIACIÓN PARA EL AGUA SUBTERRÁNEA Y SU COSTO, ASÍ COMO EL USO QUE SE LE DARÁ A LA MISMA SIN AFECTAR A LA SALUD Y AL MEDIO AMBIENTE; DEMOSTRADO POR EL CASO DE ESTUDIO EL CUAL PROPORCIONA INFORMACIÓN ESPECÍFICA DEL SITIO, ES DECIR, LOCALIZACIÓN, CLIMATOLOGÍA Y METEOROLOGÍA, HIDROLOGÍA, TOPOGRAFÍA, INVESTIGACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA, MÉTODOS DE REMEDIACIÓN Y COSTOS; TODO ESTO CON LA FINALIDAD DE LOGRAR LA META DE REMEDIACIÓN PARA EL ACUÍFERO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS.

ESTE CASO DE REMEDIACIÓN TIENE SUS PROPIOS PLANTEAMIENTOS, RIESGOS, MÉTODOS DE LIMPIEZA Y SU COSTO, ESTO ES, DEBIDO A LAS CARACTERÍSTICAS DEL SITIO Y DEL CONTAMINANTE PRESENTE EN EL AGUA SUBTERRÁNEA, ES DECIR, QUE CADA REMEDIACIÓN TENDRÁ SUS PROPIAS CARACTERÍSTICAS PARTICULARES Y DE AHÍ LAS MEJORES PROPUESTAS DE SOLUCIÓN PARA ALCANZAR LAS METAS DE LIMPIEZA SERÁN DADAS POR EL PERSONAL DEDICADO A LA REMEDIACIÓN.

POR OTRO LADO LA REMEDIACIÓN EN MÉXICO ESTA COMENZANDO A REALIZARSE CON MUY BUENOS RESULTADOS, CON LA CALIDAD Y EL PROFESIONALISMO DEL PERSONAL QUE SE DEDICA A LA LIMPIEZA DE AGUA SUBTERRÁNEA, LA CUAL ES VITAL PARA PODER SOBREVIVIR DURANTE LAS DÉCADAS SIGUIENTES, DEBIDO A QUE NOSOTROS MISMOS ESTAMOS DESTRUYENDO LO QUE LA NATURALEZA NOS BRINDA.



BIBLIOGRAFÍA.

- 📖 Hidrología Subterránea
Emilio Custodio/Manuel Ramón Llamas
Ediciones Omega
Primera Edición
Tomos 1 y 2
- 📖 El Agua Subterránea y los Pozos
Edward E. Jonson
Publicado por : Jonson División, UOP Inc. Saint Paul, Minnesota 55165
- 📖 Hidrología en Ingeniería
Germán Monsalve Sáenz
Edit. Omega
Segunda Edición.
- 📖 Geología para Ingenieros
F.G.H. Blyth
M.H. de Freitas
Compañía Editorial Continental, S. de C.V
- 📖 Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente
Jaime Porta Casanellas
Marta López-Acevedo Reguerín
Carlos Roquero de Laburu
Ediciones Mundi-Prensa
Segunda Edición
- 📖 Mecánica de Suelos Tomo 1
Juárez Badillo-Rico Rodríguez
Edi. Limusa
Tercera Edición
- 📖 Análisis de las Aguas
J. Rodier
Ediciones Omega S.A.
- 📖 Las Bases Farmacológicas de la Terapéutica.
Joel G. Ahorman
Alfredo Goodman Gilman
Mc-Graw-Hill-Interamericana
Novena Edición
- 📖 Química Orgánica Aplicada I
Rogelio Areal Guerra
Ediciones Universidad Politécnica de Catalunya
- 📖 Groundwater and Soil Remediation
Practical Methods and Strategies
Evan K. Ayer
Arcadis Geraghty & Millar



- ☞ Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales
Lenore S. Clesceri, WPCF, Presidente
Arnold E. Greenberg, APHA
R. Rhodes Trussell, AWWA
Ediciones: Díaz de Santos, S.A.
WPCF = Water Pollution Control Federation
APHA = American Public Health Association
AWWA = American Water Works Association

- ☞ Manual del Ingeniero Químico
Robert H. Perry
Mc-Graw-Hill

- ☞ La Contaminación Ambiental en México. Causas, Efectos y Tecnología Apropiada
Blanca Elena Jiménez Cisneros
Edit. Limusa S.A de C.V.

- ☞ Applied Hidrogeology
C.W. Fetter
Tercera Edición

- ☞ Handbook of Groundwater Engineering
Jacques W. Delleur
Ediciones CRC

- ☞ Estadísticas del Agua en México 2003
Comisión Nacional del Agua
Edición 2003

<http://emgrisa.es/Tematicos/residuos/SustanciasPeligrosas/limite.asp>