



01162
4
2es
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

MARÍA PATRICIA ECHEVERRÍA VAQUERO

TRABAJO

Presentado a la División de Estudios de Posgrado de la

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

como requisito para obtener
el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)**

FALLA DE ORIGEN

MARZO, 1995



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A quienes creyeron en mí, quienes con su apoyo y comprensión, con su presencia y sus palabras, alimentaron en mí el deseo de ser, a los que aún sin estar cerca representaron para mí un estímulo, a quien formó la persona que soy, a Dios, gracias:

A mi madre, por serlo

A Manuel, por estar siempre a mi lado

A mis amigos y compañeros, por saber serlo siempre
(con cariño especial a Marilú y Salvador)

A Héctor y Lety, dondequiera que estén

A mis hermanos, por todo su apoyo

A mis adorables sobrinos, por sus sonrisas

A mis maestros, y a la Universidad Nacional Autónoma de México, por la oportunidad de aprender

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por el apoyo económico en mis estudios de maestría

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

pág.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Metodología	4

CAPÍTULO 2 SEMBLANZA DEL SECTOR HÍDRICO SUBTERRÁNEO NACIONAL

2.1 Marco Geohidrológico	5
2.2 Explotaciones Subterráneas en México	21
2.2.1 Principales explotaciones acuíferas en México	33

CAPÍTULO 3 CONCEPTOS DE CONTAMINACIÓN Y CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA

3.1 Conceptos de contaminación	53
3.2 Normatividad	54
3.2.1 Aguas para abastecimiento doméstico	54
3.2.2 Aguas para la agricultura	58
3.2.3 Aguas para la industria	59
3.3 Legislación	64
3.3.1 Antecedentes	64

CAPÍTULO 4 ORÍGENES O FUENTES DE CONTAMINACIÓN

4.1 Natural	73
4.1.1 El agua de lluvia	73

4.1.2 Influencia del suelo	74
4.1.3 Influencia del terreno geológico	75
4.2 Antropogénica	76
4.2.1 Urbana	76
4.2.2 Agrícola	78
4.2.3 Industrial	81
4.3 Otras	83

CAPÍTULO 5 TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN MANTOS ACUÍFEROS

5.1 Estudios hidrogeológicos	85
5.2 Aplicación de trazadores	87
5.3 Prospección geofísica	89
5.3.1 Registros continuos y registros puntuales	90
5.3.2 Tipos de registros geofísicos	90
5.3.2.1 Métodos geofísicos de transmisión por aire y de percepción remota	91
5.3.2.2 Métodos geofísicos de superficie	92
5.3.2.3 Métodos geofísicos subterráneos	95
5.3.3 Aplicaciones de los métodos geofísicos	98
5.3.3.1 Determinación de las condiciones hidrogeológicas	99
5.3.3.2 Detección y Proyección de plumas contaminantes	100
5.3.3.3 Localización y detección de desechos enterrados y de servicios públicos canalizados	101
5.4 Perforación de pozos de exploración	101
5.5 Monitoreo y análisis del agua subterránea	103
5.5.1 Establecimiento de los antecedentes	103
5.5.2 Ubicación y diseño de pozos	105
5.5.3 Programa de muestreo	105
5.5.4 Análisis de laboratorio e interpretación de datos	106

CAPÍTULO 6 TÉCNICAS PARA EL SANEAMIENTO DE MANTOS ACUÍFEROS CONTAMINADOS

6.1 Excavación y Extracción	108
6.2 Volatilización	111
6.3 Biodegradación	112
6.4 Incineración	115
6.5 Aislamiento	116
6.6 Extracción de Agua y Tratamiento	118
6.7 Autoeliminación	122
6.8 Ejemplos de uso de métodos de saneamiento	122

CAPÍTULO 7

EJEMPLO DE APLICACIÓN

7.1 Planteamiento del problema	127
7.1.1 Descripción del área de estudio	128
7.1.2 Método propuesto de saneamiento	130
7.1.2.1 La denitrificación: conceptos	130
7.1.2.2 Factores que controlan la denitrificación	133
7.1.3 Descripción del método	133
7.1.3.1 Esquemas de sistemas de denitrificación	134
7.1.4 Aplicación del método de saneamiento	137
7.1.5 Observaciones del método	138

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones	139
8.2 Recomendaciones	140

BIBLIOGRAFÍA	142
-------------------------------	------------

ÍNDICE DE TABLAS

	pag.
1.1 Aprovechamiento medio anual de aguas en México	1
1.2 Distribución del agua por origen y destino en México	3
2.1 Explotaciones subterráneas en México	22
2.2 Principales acuíferos de México	33
2.3 Fuentes de abastecimiento de agua potable del Distrito Federal	39
2.4 Índices que muestran la presencia de materia orgánica en el agua subterránea de la ciudad de Mérida	50
2.5 Zonas con explotación excesiva de agua subterránea	52
3.1 Parámetros comparativos de la calidad del agua emitidos por la Secretaría de Salubridad y Asistencia en 1953 y la Secretaría de Salud en 1988	55
3.2 Guías de la OMS para la calidad del agua potable (1984) y su relación con la contaminación de aguas subterráneas	57
3.3 Clasificación de aguas para riego en relación a su calidad	59
3.4 Rango de las concentraciones límites recomendadas para las aguas de procesos industriales	61
3.5 Industrias a las que se refieren las Normas Oficiales Mexicanas para descargar aguas residuales	71
4.1 Principales fuentes de contaminación urbana	77
4.2 Cobertura del servicio de agua potable y alcantarillado en México	78
4.3 Principales fuentes de contaminación agrícola	80
4.4 Principales fuentes de contaminación industrial	82
4.5 Principales giros industriales responsables de las mayores descargas de aguas residuales en México	83
7.1 Concentración de nitratos (mg/l) en pozos ubicados en casas particulares	129
7.2 Concentración de nitratos (mg/l) en pozos ubicados en granjas porcícolas	129

INDICE DE FIGURAS

	pág.
1.1 Generación de aguas residuales en México	2
5.1 Tipos de registros geofísicos	91
6.1 Intercepción de un derrame mediante trincheras	109
6.2 Ventilación del subsuelo y arrastre de volátiles	111
6.3 Sistema experimental de volatilización	112
6.4 Esquema de un sistema de biodegradación aplicando nutrientes y oxígeno	114
6.5 Barrera de aislamiento de zonas contaminadas	116
6.6 Barrera subterránea para impedir el flujo del contaminante	117
6.7 Barrera mediante inyección de cemento y bentonita	118
6.8 Método para recuperación de gasolinas	119
6.9 Sistema de recuperación por cilindro	120
6.10 Cilindro de recuperación con barrera de aislamiento	121
7.1 Localización del área de estudio	128
7.2 Localización de los pozos de monitoreo	130
7.3 Ciclo del nitrógeno en el suelo	131
7.4 Descripción esquemática de la desnitrificación "in situ"	134
7.5 Descripción esquemática del sistema "doble horizontal"	135
7.6 Descripción esquemática del sistema "doble vertical"	136
7.7 Descripción esquemática del sistema "Daysi"	137

RESUMEN

Actualmente el país enfrenta diversos problemas con respecto al agua en el subsuelo como son la disminución acelerada de la disponibilidad del agua en zonas más pobladas y una creciente contaminación de los mantos acuíferos que potencialmente pueden considerarse como fuentes de abastecimiento.

Dada la importancia de las aguas del subsuelo de nuestro país es necesario contar con un documento que permita proponer algunas alternativas para la solución de problemas de contaminación del agua en el subsuelo.

En este trabajo inicialmente se presenta un análisis cuantitativo y cualitativo de las explotaciones subterráneas en México, en el segundo capítulo, se señala que una gran mayoría de los problemas de contaminación de los acuíferos en México se debe principalmente a la presencia de estratos salinos en el subsuelo y a grandes niveles de sobre explotación de dicho recurso.

En el tercer y cuarto capítulos se mencionan los conceptos básicos de contaminación, las normas tanto para abastecimiento doméstico como para agricultura e industria. Además, se presenta un breve resumen y algunos comentarios a cerca de la legislación vigente en el país con respecto a la contaminación de aguas subterráneas y las principales fuentes de contaminación.

Posteriormente en el capítulo 5 se describen las principales técnicas para la detección de mantos acuíferos contaminados: a) estudios geohidrológicos; b) aplicación de trazadores; c) prospección geofísica; d) perforación de pozos de exploración y; e) monitoreo y análisis del agua subterránea. Cada uno de estos métodos se complementan entre sí, con uno o varios de ellos para obtener un resultado satisfactorio y válido. La elección del método depende de las características y necesidades de la investigación.

Las técnicas de saneamiento de mantos acuíferos contaminados se describen de forma general en el capítulo 6, entre las principales destacan la excavación y extracción, volatilización, biodegradación, incineración, aislamiento, extracción de agua y tratamiento y la autoeliminación.

En el capítulo 7 se propone una alternativa de solución por medio de tratamiento biológico a los problemas de contaminación del agua en subsuelo que existen en algunas regiones del estado de Yucatán. El método de biodegradación propuesto es la desnitrificación; se hace un breve planteamiento del problema, el área de estudio y las concentraciones, se definen conceptos de desnitrificación y funcionamiento del método en sus diferentes esquemas, así como su posible aplicación al problema planteado.

Finalmente, como conclusiones se destacan los puntos más sobresalientes en este trabajo y se hacen algunas recomendaciones, principalmente llevar a cabo estudios geohidrológicos nuevos o actualizar los ya existentes, así como incrementar la investigación en esta área dándole con ello la importancia que merece al agua subterránea.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En México, el agua subterránea es una fuente importante de abastecimiento, sobre todo en aquellas regiones donde no ocurren escurrimientos superficiales considerables.

La importancia de estudiar la contaminación del agua del subsuelo radica en que más del 16% del agua que utilizamos los mexicanos proviene de fuentes subterráneas (Tabla 1.1), y un porcentaje considerable (68.2%) del agua de consumo urbano procede directamente de fuentes subterráneas [1].

TABLA 1.1 APROVECHAMIENTO MEDIO ANUAL DE AGUAS EN MÉXICO

	(VOLUMEN EN MILLONES DE m ³)			
	Subterráneas		Superficiales	
	Vol.	%	Vol.	%
Riego	1900	67.9	---	---
Consumo urbano	5600	20.0	2612	1.8
Uso industrial	2000	7.1	2605	1.8
Población rural	1400	5.0	---	---
Hidroeléctricas	---	---	92683	63.5
Agropecuario	---	---	48100	32.9
TOTAL	28000	100.0	146000	100.0

México enfrenta actualmente grandes problemas, entre los que destacan la disminución acelerada de la disponibilidad de agua en las zonas más pobladas y la creciente contaminación de los cuerpos de agua susceptibles a servir como fuentes de abastecimiento, ya que nuestro país no se ha podido sustraer de las consecuencias de un desarrollo acelerado, que ha propiciado un aumento en la extracción y consumo de agua que se traduce, consecuentemente, en una mayor generación de aguas residuales, que al ser descargadas sin tratamiento en los cuerpos receptores perjudican sus usos legítimos y disminuyen su potencial

de aprovechamiento, por lo que posiblemente, en un futuro cercano, se presentarán déficits críticos en algunas regiones, lo que plantea un serio desafío para las autoridades a cargo de la administración y distribución del agua y disposición de las aguas residuales.

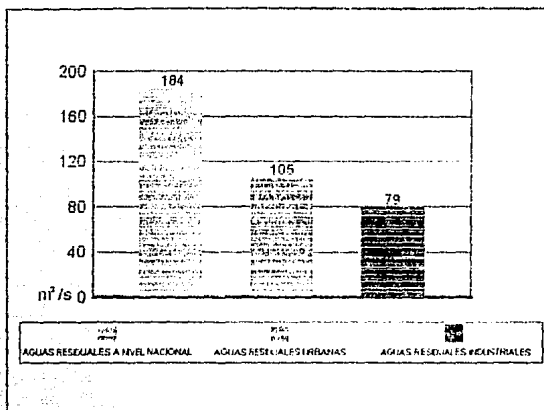


FIGURA 1.1 GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

Actualmente se genera en el país un gasto de alrededor de 184 m³/s de aguas residuales de las cuales el 57% corresponden a la población (105 m³/s) y el 43% restante a las actividades industriales [2]; esta relación se muestra en la figura 1.1.

Se ha estimado en 17,409 millones de metros cúbicos el promedio de la recarga anual y en 16,395 millones de m³ el de extracción, así como en 110,350 millones de metros cúbicos el volumen total de almacenamiento de agua subterránea [2]. No obstante el balance positivo del agua subterránea (Tabla 1.2) en el ámbito nacional, regionalmente el déficit es considerable y se cubre sobreexplotando los acuíferos.

El balance global es solo aparente y no refleja la situación crítica que prevalece en vastas regiones de nuestro territorio, porque la mayor parte de la explotación tiene lugar en las zonas áridas, donde la recarga es pobre y el balance hidráulico negativo, por lo que se está consumiendo el almacenamiento subterráneo.

Como lo refiere la Tabla 1.2, el consumo de agua en el país es actualmente de unos 174 mil millones de m³/año; en las últimas tres décadas, la extracción de agua subterránea ha progresado con un ritmo acelerado hasta alcanzar la cifra de 28 mil millones de m³/año, representando el 70% del agua recargada. El consumo en irrigación es más del 67% del consumo total de agua del subsuelo [1].

Tanto la población como la actividad económica en México se distribuyen en relación inversa a la disponibilidad de agua. De acuerdo con las distribuciones espaciales de lluvia y temperatura, 52.7% del territorio está bajo déficit hídrico (desértico, árido y semiárido) mientras que 47.3% es subhúmedo y húmedo. Menos de una tercera parte del escurrimiento superficial ocurre en el 75% del territorio, donde se concentran los mayores núcleos de población, las industrias y las tierras de riego [1].

La insuficiencia en las aguas superficiales y subterráneas para el abastecimiento, conduce a la sobreexplotación de acuíferos y obliga a hacer transferencias entre cuencas. La contaminación, por otra parte, ha reducido el potencial de uso de varios acuíferos, ríos y

cuerpos de agua.

Además, en nuestro país hay numerosos acuíferos que se están salinizando gradualmente por sobreexplotación. Este efecto perjudicial amenaza la producción en importantes áreas agrícolas. Los acuíferos sobreexplotados requieren una reglamentación de extracciones, para moderar la explotación de las aguas del subsuelo y restablecer el equilibrio.

TABLA 1.2 DISTRIBUCIÓN DEL AGUA POR ORIGEN Y DESTINO EN MÉXICO

(VOLUMEN EN MILLONES DE m ³ /AÑO)			
Lluvia	1570000	Agua Utilizada	Flujo a lagos ints. o al mar, sin aprovechamientos
Pérdidas por evaporación	1120000	----	----
Escorrentamiento Superficial	410000	146000 (83.9%)	264000 (95.7%)
Recarga de Acuíferos	40000	28000 (16.1%)	12000 (4.3%)
Disponibilidad Total	450000	174000	276000

No debe restarse importancia a la sobreexplotación, argumentando que la corteza terrestre almacena reservas de agua dulce y que debajo de los acuíferos someros hasta ahora explotados se encuentran gigantescos mantos prácticamente vírgenes. Si bien es cierto que en los primeros 300 m de profundidad, contados a partir de la superficie del terreno, el subsuelo de México almacena un volumen de agua del orden de 5 billones de m³ y que las exploraciones han revelado la existencia de acuíferos regionales que se extienden bajo 2 ó más cuencas hidrográficas, no es posible garantizar que estos acuíferos ofrezcan agua de calidad suficiente, en cantidad adecuada, en costo accesible y con la distribución geográfica necesaria para cubrir el déficit actual de los acuíferos sobreexplotados y satisfacer el incremento de las demandas a largo plazo [1].

Por todo esto, y dada la alta vulnerabilidad de los acuíferos del país ante la contaminación, se requiere contar con un documento que permita proponer alternativas de solución para la prevención y/o el control de una posible contingencia ambiental.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos que constituyen la base del presente trabajo son:

- 1.- Emitir un análisis del marco geohidrológico del país.
- 2.- Con base en las investigaciones y experiencias del Gobierno Federal, exponer un diagnóstico y evaluación de los mantos acuíferos del país en sus aspectos cualitativo y cuantitativo.

- 3.- La realización de un análisis previo del problema general de contaminación del agua, identificando las fuentes de contaminación tanto natural como antropogénica en sus tres giros, urbano, agrícola e industrial.
- 4.- Analizar las fallas de estrategia para el control de la contaminación del agua, también analizar la necesaria interacción entre las diversas entidades del Gobierno Federal, Estatal y Municipal en la materia.
- 5.- Mediante el análisis de la literatura existente, inherente al caso, generar un compendio relativo a:
 - Conceptos de contaminación
 - Normas y criterios nacionales e internacionales de calidad para agua en sus diferentes aplicaciones útiles.
 - Leyes que rigen actualmente la calidad del agua y los límites de descargas por diferentes fuentes a los varios cuerpos receptores.
 - Orígenes o principales fuentes de contaminación de explotaciones acuíferas en el país.
 - Técnicas para la detección de la contaminación en mantos acuíferos.
 - Técnicas para el saneamiento de mantos acuíferos contaminados.

1.3 METODOLOGÍA

La metodología a seguir para la elaboración del presente trabajo se puede enumerar de la siguiente forma:

- 1.- Recopilación de la información referente a las características geohidrológicas de las diferentes regiones del país.
- 2.- Investigación de la cantidad de explotaciones subterráneas del país, selección de las principales y realización de su análisis geohidrológico relativo a su potencial y calidad.
- 3.- Investigación de las principales fuentes de contaminación del país.
- 4.- Recopilación y análisis de las normas de calidad del agua vigentes, así como de leyes que controlan la calidad de ésta.
- 5.- Recopilación y análisis de información, tanto nacional como internacional, de técnicas de detección de contaminación de mantos acuíferos y técnicas de saneamiento cuando éstos presentan contaminación.

CAPÍTULO 2

SEMBLANZA DEL SECTOR HÍDRICO SUBTERRÁNEO NACIONAL

2.1 MARCO GEOHIDROLÓGICO

La división de la República Mexicana en provincias hidrogeológicas (véase ilustración 2.1), es la respuesta a la necesidad de identificar regionalmente a ciertas áreas que se singularizan por su fisiografía y homogeneidad geológica-estructural, así como por ciertas características hidráulicas como la porosidad y transmisividad de las rocas.

En esta delimitación de provincias hidrogeológicas se tomo como base la división de las regiones hidrológicas de la SARH; la división de las provincias fisiográficas y geológicas así como la de los terrenos tectonoestratigráficos del país, se considero también, como parte fundamental el comportamiento del agua subterránea en cada una [3].

Al considerar los diferentes factores a los que se hizo mención, el país se dividió en 11 provincias hidrogeológicas, resaltando de cada una su distribución y extensión, así como sus condiciones climáticas e hidrogeológicas.

Para tener un panorama general sobre el comportamiento de las rocas con respecto al agua subterránea en las diferentes regiones, se presenta esta división.

PROVINCIAS HIDROGEOLÓGICAS

1.- PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA

LOCALIZACIÓN. La Península de Baja California abarca una superficie de 143,492 km² e incluye totalmente los estados de Baja California y Baja California Sur; se caracteriza por estar constituida por montañas de forma irregular, con una orientación general noroeste-sureste, teniendo a sus alrededores cuencas rellenas con materiales sedimentarios. La elevación de la Península varía desde el nivel del mar, en el Océano Pacífico y el Golfo de California, hasta 2000 m, en la parte más alta de las montañas.

CLIMA. La temperatura media anual fluctúa de 16°C en la zona costera a 21°C en el desierto con una variación de 38°C en verano y un clima tipo mediterráneo en el área costera; la precipitación ocurre principalmente en el invierno variando de 50 mm/año en el desierto, entre 100 y 300 mm/año a lo largo de la costa y hasta 450 mm/año en las zonas montañosas.

PROVINCIAS HIDROGEOLÓGICAS DE MÉXICO

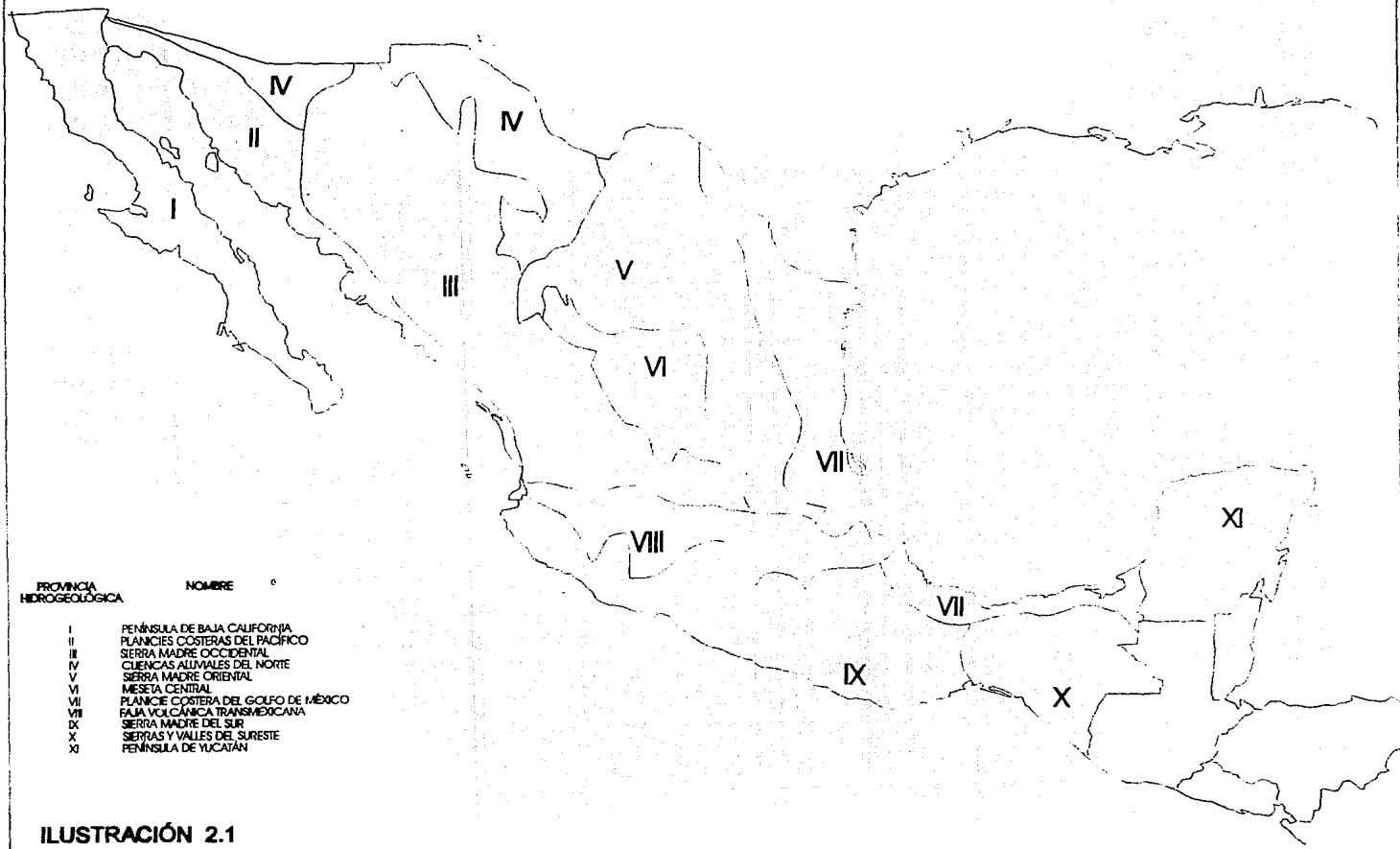


ILUSTRACIÓN 2.1

HIDROGEOLOGÍA. Las principales zonas de recarga son las áreas montañosas, por su alta elevación y precipitación, y donde se inician las corrientes superficiales más importantes que llegan hasta las cuencas aluviales más bajas. Las rocas consolidadas que forman partes de las montañas, constituyen acuíferos con transmisividades menores a $185 \text{ m}^2/\text{día}$ y conductividades hidráulicas menores a 3 m/día ; las características hidráulicas son generalmente el resultado de la permeabilidad por fractura, y cerca de la superficie, por el intemperismo de las rocas.

La Formación Salada del Cuaternario Reciente, constituida por areniscas arcillosas, arenas, limos y arcillas de tipo marino, aluvial, eólico y deltáico, representa los principales acuíferos en explotación.

En la Península de Baja California las cuencas aluviales del Cuaternario Reciente son pequeñas. El relleno sedimentario es menor de 100 m, con un espesor y una anchura promedio de 5 km; son de forma irregular y los cauces de las corrientes se interdigitan y se extienden de 8 a 15 km, tierra adentro desde la costa. Debajo de los cauces de los arroyos estas rocas sedimentarias del Plioceno y Pleistoceno consisten en areniscas y lutitas intercaladas con conglomerados y estratos de arena y arcilla; los sedimentos producen menos agua que el aluvión, cubren una mayor área y tienen como máximo espesor 600 m.

La mayoría del área de tierra adentro consta de montañas formadas principalmente por rocas ígneas y metamórficas precenozoicas; el tipo de roca dominante es granito, el cual produce agua básicamente de un sistema de fracturas que llega como máximo hasta 100 m de profundidad. Los granitos remanentes se intemperizan con facilidad y la desintegración granítica produce agua para pozos menores de 30 m de profundidad. En el nivel regional la ocurrencia y el movimiento del agua subterránea del acuífero son en gran parte controlados por la topografía.

La cordillera peninsular se extiende desde Tijuana-Mexicali hasta los Cabos, con aproximadamente 1700 km de largo y de 50 a 100 km de ancho; las cordilleras montañosas al norte son largos batolitos graníticos que en los flancos tiene rocas metamórficas y sedimentarias del Mesozoico y, al sur, predominan rocas sedimentarias y volcánicas del Cenozoico.

La península, en lo general, es un gran bloque de falla que se está separando de la parte continental de México. Sus acuíferos, a excepción del de Mexicali, son casi inexistentes debido a la falta de infiltración, al resultado de precipitaciones dispersas en pequeñas áreas de captación y a la baja permeabilidad de las rocas.

2.- PLANICIES COSTERAS DEL PACÍFICO

LOCALIZACIÓN. Esta provincia hidrogeológica abarca una superficie aproximada de $104,491 \text{ km}^2$ y comprende la porción occidental de los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit; limita al norte con el Valle Imperial de los Estados Unidos y al sur y poniente, con el Océano Pacífico. La elevación de toda esta provincia varía desde el nivel del mar hasta los 200 m.

CLIMA. Las condiciones climáticas varían de desérticas a semidesérticas; la temperatura media anual cambia de 16°C en la zona costera a 21°C en el desierto, y alcanza los 38°C en el verano. La precipitación ocurre principalmente en el invierno, variando de 50 mm/año en el desierto hasta 380 mm/año a lo largo de la costa, incrementándose hacia los flancos de la Sierra Madre Occidental.

HIDROGEOLOGÍA. Las rocas que predominan son sedimentarias, metamórficas e ígneas; éstas últimas ocupan una gran área y suprayacen a antiguas superficies de erosión de rocas sedimentarias y plutónicas; en general, estas rocas son bordeadas por los sedimentos aluviales que, junto a los derrames volcánicos del cenozoico constituyen los mejores acuíferos.

Los principales acuíferos están asociados a deltas cercanos a las costas; al oriente, hacia las partes altas, se encuentran en los abanicos aluviales formados de materiales gruesos provenientes de las montañas cercanas, son de poco espesor y de niveles profundos.

Los espesores más potentes de la planicie costera se encuentran en sedimentos continentales y marinos intercalados por derrames basálticos: La Formación Baucari, constituida por conglomerados, subyace a los mejores acuíferos en depósitos aluviales; esta formación de origen sedimentario continental, presenta una permeabilidad de media a baja, ya que en ella prevalece el contenido de arcillas compactas.

En la meseta arenosa de San Luis Río Colorado, el acuífero está constituido por los sedimentos clásticos semiconsolidados que rellenan las depresiones formadas por las rocas pre-terciarias y cuya recarga subterránea proviene del lado norteamericano. El inconveniente de esta región es que el nivel estático del acuífero es profundo, por arriba de los 100 m.

En el resto de los acuíferos que se localizan desde Caborca, en Sonora, hasta el Valle de Bahía de Banderas en Nayarit, la gran mayoría está constituida por sedimentos arenosos aluviales con buena porosidad y permeabilidad.

3.- SIERRA MADRE OCCIDENTAL

LOCALIZACIÓN. Cubre aproximadamente 358,845 km². Esta cadena tiene 1500 Km de longitud y es esencialmente paralela a la costa occidental de México. Se extiende desde el límite internacional, cerca de la población de Agua Prieta, en dirección sureste, hasta la región del Cinturón volcánico, en el paralelo 20° de latitud norte. El ancho promedio de la sierra es de 220 km.

CLIMA. Las condiciones climatológicas de esta zona varían desde húmedo templado, con lluvias todo el año en las partes altas de la sierra, a un clima de estepa seco al este, y en las partes bajas, al lado oeste, es caluroso y húmedo con lluvias en el verano.

La precipitación en la Sierra Madre Occidental es principalmente de tipo orogénico; hacia la parte sur y cerca del Pacífico, la lluvia es mayor que 1600 mm/año; en la parte central, el promedio de la lluvia es ligeramente menor y en la porción oriental decrece hasta 600 mm.

La precipitación máxima sucede de junio a septiembre y la mínima va de marzo a mayo; la temperatura media anual varía desde 12°C en el área alta hasta 22°C en las áreas bajas de la vertiente del Océano-Pacífico, en la región de la Meseta central. La temperatura media es de 16°C, la evaporación potencial excede a los 2000 mm/año.

HIDROGEOLOGÍA. Los ríos que descargan en el Pacífico son virtualmente perennes y los cauces en la parte baja son de gran longitud; por ejemplo, los ríos Yaqui y Culiacán tienen 680 y 340 km, respectivamente. Los principales ríos que fluyen hacia las cuencas aluviales del norte y Mesa Central son intermitentes, como el Conchos y el Nazas con longitudes respectivas de 480 y 400 km. Las grandes cantidades de agua superficial y subterránea que drenan al Pacífico son resultado de las abundantes lluvias que caen sobre las rocas con un amplio rango de permeabilidades.

Hacia el oriente, donde se encuentra el altiplano o las áreas de mesetas altas, hay flujos de lava, asociados con piroclásticos y conglomerados, donde la infiltración es pequeña debido a lo compacto de estos materiales y a lo abrupto de la topografía que favorece más bien una gran disección fluvial.

El flujo de las corrientes aumenta por el flujo base de las rocas de baja permeabilidad que afloran a lo largo del cauce. Los principales ríos son el Yaqui, con flujo promedio anual de 2700 Mm³/año; el Culiacán, con 3500 Mm³/año, el Nazas con 1100 Mm³/año, y el Conchos, con 5100 Mm³/año. La alta precipitación y los numerosos embalses son una contribución directa para los sistemas de agua subterránea. La recarga afecta a los manantiales que están a decenas de kilómetros de los embalses.

Hacia la porción occidental, esta provincia se encuentra constituida por densos bloques de lava inclinados, con grandes fallas, que dan idea de los fuertes eventos tectónicos a los que estuvieron sometidas estas rocas de carácter riolítico fuertemente compactas y con poca infiltración. Estas rocas de baja permeabilidad constituyen el acuitardo. Su ancho y gran espesor, así como la relativa posición topográfica horizontal que tienen, hacen que la explotación del agua del subsuelo sea en pequeña escala y solo se use para el suministro de pequeños poblados.

En general, el carácter hidrogeológico de esta provincia es tal, que la gran cantidad de agua captada en las cadenas montañosas se descarga local y regionalmente para escurrir a lo largo de las principales corrientes superficiales, salir de estas e infiltrarse y recargar los grandes acuíferos de las provincias adyacentes.

4.- CUENCAS ALUVIALES DEL NORTE

LOCALIZACIÓN. Las cuencas aluviales del norte de México abarcan una superficie aproximada de 205,000 km². La forma del terreno del área es característica de una fisiografía de cuencas y cordilleras con formación de montañas que se levantan separadas por extensas planicies aluviales. Las estructuras que se presentan manifestando el hundimiento vertiginoso de las rocas preexistentes se efectúa durante el Terciario Medio y Superior; la tendencia de las montañas es en general norte-noroeste y dividen el área en varias cuencas; el término cuenca se refiere al graben rellenado por sedimentos situados entre las montañas, las cuales pueden tener drenaje endorréico y exorréico.

CLIMA. En esta región varía de árido a semiárido y la temperatura media anual oscila entre 14°C y 18°C en toda la provincia. La precipitación esta relacionada con la altitud de la superficie del terreno y en esta área la precipitación media anual varía de 400 a 800 mm. Las lluvias son sumamente raras y son absorbidas rápidamente por un suelo sediento, por lo que dichas aguas nunca llegan a verter al mar ni se juntan en cantidades grandes en el interior de los bolsones; por esta circunstancia en esta provincia no existen verdaderas corrientes.

HIDROGEOLOGÍA. La región de las cuencas aluviales del norte incluye rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, que pueden dividirse en dos grandes grupos de edades correspondientes al pre-Cenozoico y al Cenozoico. Las rocas de ambos grupos difieren en estructura, tipo y características del acuífero; en general, las precenozoicas forman las montañas que bordean las cuencas aluviales.

Las montañas están constituidas de granito de edad precámbrica, esquistos, gneis, filitas, pizarras y cuarcitas (del Precámbrico al Terciario Inferior), rocas sedimentarias

carbonatadas, areniscas, limolitas y lutitas del Paleozoico al Mesozoico, y diversos tipos de rocas ígneas intrusivas y extrusivas del Cretácico Superior. Aunque estas rocas no forman parte significativa del acuífero, proporcionan la fuente de los materiales que rellenan las cuencas. También, sus características litológicas y estructurales influyen en las salidas de agua y en la infiltración, de allí que el agua circule y abastezca a las cuencas.

Las rocas del Cenozoico que rellenan las cuencas consisten en depósitos clásticos consolidados y no consolidados, interdigitados con rocas volcánicas. Los sedimentos fueron depositados durante y desde la formación de las cordilleras y cuencas propiciadas por fallas. Los depósitos más viejos son del Terciario Inferior al Medio y pueden tener varios miles de metros de espesor en algunos lugares. Las extensas áreas de dichos depósitos son poco conocidas. Intercalados en éstas se encuentran amplios depósitos de rocas volcánicas del Terciario Medio; los sedimentos fueron depositados en cuencas cerradas con orientación nortenoeste creadas por la tectónica extensiva.

Los abanicos aluviales en la base de las montañas se unen para formar extensos depósitos de pie de monte y los depósitos tipo playa ocurren cerca del centro, en la zona más baja de la cuenca; este tipo de medio ambiente de depósito produce dos facies generales de cuenca: grano fino y bien seleccionado cerca del centro de la cuenca y grano grueso y pobremente seleccionado cerca del frente de la montaña; las facies de grano fino, en general, se localizan hacia el interior de la cuenca limitada por las fallas; en las cuencas cerradas las evaporitas se asocian íntimamente con las facies de sedimentos finos. La evaporita más común es el yeso, el cual está diseminado dentro de los depósitos finos o en estratos delgados. La anhidrita masiva y los depósitos de halita están presentes en algunas cuencas profundas y pueden tener cientos de metros de espesor. La facie de grano grueso es altamente heterogénea y los sedimentos varían desde limos y arcillas a guijarros y cantos rodados.

Las extensas áreas de los depósitos de cuencas fueron alteradas como resultado de un cambio en los esfuerzos tensionales de tipo regional que se produjeron durante el Mioceno Medio y Superior, el fallamiento normal profundo progresó de oeste a este durante ese período y fue acompañado por vulcanismo basáltico. Este período de formación de fallas dio lugar a la actual distribución de cordilleras y cuencas. Las cuencas del norte de México poseen su desagüe superficial cerrado; la mayoría de ellas también tiene un sistema de agua subterránea cerrado. Los depósitos del centro de las cuencas en gran parte son lacustres y consisten principalmente en limos, arcillas y evaporitas.

Los mayores acuíferos del área están compuestos de sedimentos de cuenca del Cenozoico, los cuales están contenidos dentro de los grabens, entre los bloques montañosos, y las montañas actúan como límites hidrogeológicos. Los sedimentos de la cuenca, en general, están hidráulicamente interconectados y forman un acuífero simple; localmente, la separación en una o varias unidades confinadas y una unidad superior libre, ocurre como resultado de la intervención de unidades de grano fino y, en algunos lugares por intercalaciones de rocas volcánicas. Los sedimentos de cuenca se estiman de 2000 m de espesor y en algunos otros lugares pueden contener menos de 300 m.

En general el marco hidrológico de las cuencas cerradas es de dos tipos, endorréicas o exorréicas, como la de la Laguna de Guzmán y Santa María, en el estado de Chihuahua. Se desconoce el flujo del agua superficial o el de la subterránea, al salir de la cuenca. Antes de su desarrollo, el mecanismo de descarga consistía en evaporación y transpiración de la vegetación, lo cual ocurre cerca del centro de la cuenca cerrada, bajo las presentes condiciones de desarrollo, siendo la mayor parte de la descarga a través de pozos.

Algunas de las cuencas que no son cerradas pueden estar hidráulicamente interconectadas y la salida de una puede ser parte de la entrada de otra en la dirección que

baja el gradiente; muchas de las cuencas aluviales que son abiertas y están incluidas en un sistema regional en el cual, por lo general, se alinean en la misma dirección del flujo y tienen el sistema de salida de agua superficial. El flujo del agua subterránea en cada cuenca es controlado por el volumen y distribución del área de recarga y descarga y por las propiedades hidráulicas de los materiales del acuífero. La recarga está relacionada con la cantidad de precipitación alrededor de las montañas; dicha recarga se incrementa con la altitud y ocurre principalmente en el área de contacto aluvión-roca, en el frente de la montaña y a lo largo de la superficie de desagüe, cerca del eje central de la cuenca. El flujo subterráneo que entra y sale de las cuencas ocurre en la zona de unión entre ellas pero normalmente es pequeño; sin embargo, puede constituir una gran parte del total de la recarga en la mayoría de las cuencas del norte de Sonora. Bajo las condiciones anteriores al desarrollo, la descarga de las cuencas con sistema de desagüe ocurre como flujos subterráneos, evapotranspiración y corrientes.

La influencia geológica en la hidrología de las cuencas aluviales del norte es importante porque determina la ocurrencia y el movimiento de las aguas subterráneas. Los límites laterales y verticales del sistema acuífero en una cuenca están controlados por los cambios litológicos y de permeabilidad, los cuales se relacionan con la forma de depositación aluvial y con la estructura geológica.

Las rocas pre-cenozoicas y volcánicas cenozoicas generalmente son de baja permeabilidad y dificultan el movimiento del agua subterránea, pero pueden ocurrir en rocas carbonatadas que no tienen que ser significativamente perturbadas a nivel estructural. El material aluvial que forma el acuífero principal en las cuencas fue erosionado de las montañas adyacentes por las corrientes con fuerte gradiente y depositado como abanicos aluviales. En general, los depósitos en abanico se van haciendo cada vez más finos hacia el centro de las cuencas; sin embargo, algunos estratos de grano grueso pueden extenderse hasta la parte central, permitiendo que los altos y bajos de la conductividad hidráulica de los materiales tiendan a disminuir con el incremento en los grados de deformación y consolidación y con el incremento en las proporciones de material grueso y fino. Los depósitos de pre-cuenca y de las cordilleras están interdigitados con rocas volcánicas y son deformados en el nivel estructural; se presenta de moderada a altamente consolidados y constituyen acuíferos pobres. Las cuencas bajas rellenadas cerca de la grieta del río Grande fueron perturbadas por una falla normal pero no tiene inclinación fuerte y son acuíferos importantes. Cerca de los centros de las cuencas a lo largo del río Grande, éstas se rellenaron con material fino y, en consecuencia, no son buenas productoras de agua.

5.- SIERRA MADRE ORIENTAL

LOCALIZACIÓN. Esta provincia cubre una superficie de 250,096 km². Se divide en tres subregiones: la norte, la central y la sur, que se han designado respectivamente, como: sector Sierra del Burro, sector Ojinaga-La Paila y sector Sierra Madre Torreón-Monterrey-Tamazunchale.

CLIMA. Las condiciones climáticas de la Sierra Madre Oriental varía con la topografía y la latitud. Predominan dos tipos principales de climas: el templado-semicálido-semiárido que abarca desde el río Bravo y el centro de Coahuila y continúa por toda la porción occidental de la sierra; aquí la precipitación media anual es de 500 mm y la temperatura de 22°C, que disminuye localmente en algunos sitios altos hasta los 16°C. El otro tipo de clima en la porción oriental de la sierra abarca desde el sur de Monterrey hasta el límite de la Faja volcánica

transmexicana; se caracteriza por variar de tropical húmedo o templado a subhúmedo y semicálido a húmedo; la precipitación media anual en esta zona varía de 700 mm en la cercanía de Monterrey hasta 2000 mm en la porción norte del estado de Hidalgo. La temperatura media anual es de 22°C.

HIDROGEOLOGÍA. La infiltración, circulación y ocurrencia del agua subterránea en la Sierra Madre Oriental están directamente influenciadas por la litología y estructura de las rocas. Esta región se compone básicamente de una serie de rocas calcáreas plegadas de edad cretácica, que tienen una orientación general noroeste-sureste. La característica principal de esta provincia es que esta secuencia de rocas carbonatadas permeables se encuentra empaquetada entre dos secuencias de carácter arcillo-calcáreo en la base y arcillo-arenoso en la cima, correspondientes a los depósitos del Jurásico Superior y Cretácico Superior, respectivamente, y que forman los materiales confinantes.

-Sector Sierra del Burro

Las rocas del Cretácico Inferior y Medio que se localizan en esta sierra son altamente solubles, calizas de estratificación mediana con pequeñas cantidades de lutitas. Estas rocas varían lateralmente dentro del arrecife Stuart City, el cual tiene una alta porosidad primaria y algunas fracturas que incrementan la permeabilidad. Las rocas del Cretácico Superior contienen más arcilla y tienen una permeabilidad más baja.

El flanco este de la Sierra del Burro está cubierto por rellenos aluviales y conglomerados del Terciario y Cuaternario, producidos por la erosión e intemperismo de las regiones topográficamente más altas. Estos depósitos tienen un espesor aproximado de 50 m, son altamente permeables y contienen importantes volúmenes de agua subterránea.

Las diferentes unidades de rocas que existen en la subregión contienen acuíferos confinados. Algunas de las estrechas capas confinantes se rompieron por esfuerzos tensionantes que mejoraron el grado de interconexión hidráulica entre los acuíferos. Estos son recargados por el agua de lluvia que se infiltra en las partes altas de la Sierra del Burro y, generalmente, fluyen al noreste.

La prolongación sureste de la Sierra del Burro, conocida como el anticlinal Payote, es un anticlinal con flancos suavemente buzantes. Aquí los afloramientos de la Formación Austin están constituidos por rocas calcáreas con pequeñas cantidades de pizarras. En la parte fracturada de esta formación ocurre un acuífero somero de pequeño potencial. El flanco de la Sierra del Burro está cubierto por aluvión granular permeable de 30 a 50 m de espesor, el cual es recargado por el acuífero en las calizas.

-Sector Ojinaga-La Paila

Esta subregión en rocas calcáreas plegadas del Cretácico forma una serie de anticlinales que, a su vez, producen sierras orientadas noroeste-sureste. Las sierras emergen en forma aislada dentro de las planicies formadas por el material aluvial. Estos sedimentos del Cretácico fueron depositados en un mar abierto sobre una plataforma y están constituidos por micrita densa, con poca o nula permeabilidad primaria. Dichos sedimentos no forman acuíferos, excepto en las zonas plegadas que han sido fracturadas, donde la disolución a lo largo de las fracturas resulta del desarrollo de buena permeabilidad.

En esta subregión se localizan dos tipos de acuíferos, los que ocurren en los rellenos sedimentarios y aquellos que se presentan en las calizas.

Los acuíferos en los sedimentos granulares de los valles y cuencas contienen arenas y arcillas de baja permeabilidad y aguas salinas derivadas de la evaporación de los materiales

acumulados en las porciones centrales de las cuencas. Los acuíferos en las calizas del Cretácico Medio afloran en las sierras y son recargados directamente por la lluvia; esta recarga se mueve hacia la parte baja de los valles. Las perforaciones profundas localizadas en los flancos de las sierras penetran a los acuíferos a profundidades de 1000 y 2000 m. Cerca de los pisos de los valles, las fracturas que penetran los acuíferos, dan lugar a grandes manantiales, como los de Múzquiz, Monclova y Cuatro Ciénegas, con gasto de 1000 l/s.

-Sector Sierra Madre Torreón-Monterrey-Tamazunchale

Entre las sierras que se encuentran en la cercanía de Torreón existen valles intermontanos y cuencas constituidas por materiales aluviales formadores de acuíferos. La región de la Laguna de Torreón es una área de clima árido y una de las principales regiones agrícolas de México. En ella existen alrededor de 3000 pozos para irrigación que tienen sobreexplotado al acuífero aluvial. Hacia el oeste y sur, los acuíferos de las rocas carbonatadas presentan espesores mayores de 1000 m.

Las calizas pueden o no contener pequeñas cantidades de lutitas, están dolomitizadas y han estado sujetas a disolución. Este acuífero recarga a los aluviones sobreexplotados de la Región Lagunera, como se confirmó por los estudios isotópicos. En la zona de Monterrey, en la parte más grande de la sierra, existen complejos arrecifales con una permeabilidad primaria que aumenta por el fracturamiento y forma zonas altamente permeables. Las elevaciones más altas representan las zonas de recarga y en las más bajas se localizan los acuíferos. Los anticlinales que forman los cerros de esta región tienen fuertes pendientes con flancos inclinados y estratos escarpados que favorecen la porosidad primaria y la secundaria, lo que permite el desarrollo de acuíferos de gran potencial. Sobre los flancos y anticlinales con nariz buzante de estas estructuras, el agua se encuentra a una profundidad aproximada de 1000m y bajo condiciones artesianas. Este tipo de acuífero es principalmente explotado en la zona de Monterrey-Saltito, donde la abundante producción satisface las necesidades de Monterrey, la tercera metrópoli más grande del país.

En la parte sur de la Sierra Madre Oriental, en la zona de Tamazunchale, el agua se infiltra en las porciones altas de ésta y es descargada a través de grandes manantiales en la base de las sierras adyacentes a la planicie costera. Los patrones de sedimentación de los carbonatos juegan un papel fundamental en el desarrollo del acuífero, la extensión del complejo arrecifal, el abra-doctor que se formó en los márgenes de la plataforma Valles-San Luis Potosí en el Albiano Cenomaniano, contiene carbonatos con alta permeabilidad. En el área existen numerosas dolinas y huecos donde el agua se infiltra, fluye lateralmente y descarga en forma de manantiales en la base de la sierra. Estos manantiales, como el Coy y el Frío, se consideran entre los más grandes del mundo, ya que tienen descargas de 25 m³/s.

6.- MESETA CENTRAL

LOCALIZACIÓN. La Meseta Central se ubica en la parte central del país. Comprende una superficie de aproximadamente 102,519 km² e incluye parte de los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato y Querétaro. Limita en sus porciones boreales y orientales con la Sierra Madre Oriental; al sur, con la Franja volcánica transmexicana y al poniente, con la Sierra Madre Occidental.

CLIMA. La Meseta Central es muy uniforme en sus condiciones climáticas debido probablemente a su latitud y a su característica morfológica; en la mayor parte de la provincia

predomina un clima de templado-semiseco a semiárido, con un microclima (al sur de San Juan de Guadalupe, Durango) semicálido, seco o árido. La precipitación media anual varía de 350mm/año en San Juan de Guadalupe, a 600mm/año en la zona de Sombrerete, Zacatecas; en general, en toda la provincia predomina una precipitación media de 400mm/año. La temperatura media anual oscila entre 16°C y 18°C en toda la provincia.

HIDROGEOLOGÍA. La Meseta Central abarca parte de varias cuencas hidrológicas como las cerradas y áridas del norte, donde el agua es un recurso bajo y exiguo; la de Aguanaval; la de Nazas en su parte media; la del Grande de Santiago con los ríos Juchipila, Verde, San Juan de los Lagos y sus tributarios más orientales, así como los afluentes del Lerma y las sierras y llanuras del norte de Guanajuato.

En esta provincia hidrogeológica se encuentran rocas metamórficas, sedimentarias, consolidadas y no consolidadas y rocas ígneas extrusivas e intrusivas. En este conjunto existen algunas que son permeables, otras poco permeables y otras impermeables.

Entre las rocas permeables se considera a los conglomerados y areniscas de la Formación Nazas, las calizas de las formaciones Zuloaga y Cuesta del Cura, las rocas riolíticas en algunas áreas y los sedimentos granulares que rellenan los extensos valles. De estos materiales, los que constituyen los principales acuíferos de toda la provincia son los sedimentos granulares, aunque en algunas zonas como la ixtlera, la mayoría de estos acuíferos contienen agua de mala calidad. Entre los acuíferos donde se encuentran estos materiales destacan, entre otros, los de Calera, Vicente Guerrero, La Blanca, Aguascalientes, Ojo Caliente y San Luis Potosí, la mayoría con problemas de sobreexplotación. Las rocas volcánicas riolíticas tienen una permeabilidad anisotrópica, debido posiblemente al fracturamiento en las zonas de falla o a sus características físicas, adquiridas durante las etapas de piroconsolidación. Existen varias zonas donde estas rocas constituyen acuíferos: la de Ojo Caliente, en Zacatecas, el Llano en Aguascalientes, Villa de Arriaga y Gogorrón, en San Luis Potosí y San Juan del Río en Durango. Entre éstas, las que más destacan son las de Gogorrón y San Juan del Río por haber pozos brotantes con caudales mayores a los 80 l/s. Sin embargo, es conveniente aclarar que en otras áreas, como El Llano y Villa de Arriaga, los niveles son profundos y los caudales modestos.

Una característica de los acuíferos riolíticos es el termalismo de sus aguas, que en ocasiones alcanzan hasta 42°C. En lo que se refiere a las calizas de la Formación Cuesta del Cura, dado que son rocas depositadas en una cuenca con porosidad primaria casi nula, es muy posible que ésta se haya incrementado por el fracturamiento como consecuencia del plegamiento y afallamiento sufridos durante la revolución taramílica. Como evidencia estas rocas son permeables en algunas áreas, se tiene el pozo emplazado en la zona de Calabazal en Sombrerete, Zacatecas, el cual proporciona un caudal de 130 l/s, con una profundidad del nivel dinámico de 60 m. Otro sitio donde se encuentra otro pozo en estas calizas es el poblado de Manuel Avila Camacho, al sureste de San Juan de los Morteros, al norte de Zacatecas, el cual resulta brotante con 1 l/s. En Aguascalientes, al poniente de la sierra de Tepezala, en un lugar denominado Las Pilas, se localizó otro pozo con 72 l/s. En Durango, por la zona de Ramón Corona, se conocen varias grutas, lo que significa que por lo menos en algunos lugares estas rocas están afectadas por la disolución.

Las rocas en las cuencas aluviales incluyen metamórficas, ígneas y sedimentarias del Paleozoico Superior al Reciente; en general, estas rocas están bordeadas por los sedimentos aluviales. Las rocas son: esquistos, calizas, areniscas y lutitas del Mesozoico e ígneas intrusivas y extrusivas del Mesozoico y Cenozoico. Aunque no forman parte de los acuíferos de la región, si funcionan como basamento o barrera para el flujo subterráneo, además son las

que han dado origen a los sedimentos granulares que constituyen el sistema acuífero de mayores almacenamientos de agua subterránea en esta provincia.

Los depósitos granulares aluviales van del Terciario Medio hasta el reciente y consisten en clásticos consolidados y no consolidados, intercalados con rocas volcánicas, entre las que predominan las ignimbritas riolíticas. Dichos depósitos granulares tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la revolución laramídica.

Los depósitos granulares abarcan del Terciario Inferior hasta el Cuaternario. Los abanicos aluviales están formados al pie de las montañas de las diversas cuencas cerradas del centro de México, propiciando el depósito de sales asociadas con arcillas, limos y arenas. La mayoría de las cuencas están separadas y no tienen conexión hidráulica, por lo que el análisis geohidrológico de cada una no resulta tan complejo. Los principales acuíferos de esta provincia hidrogeológica lo constituyen los materiales granulares depositados en cuencas cerradas o abiertas, salvo en casos excepcionales, como el Valle de Guadiana en Durango, donde el acuífero se encuentra en rocas volcánicas.

7.- PLANICIES COSTERAS DEL GOLFO DE MÉXICO

LOCALIZACIÓN. La provincia fisiográfica de la Planicie costera del Golfo, se desarrolla de suavemente ondulada a plana y ocupa una área de 183,313 km², extendiéndose desde el río Bravo hasta la Laguna de Términos, cerca del suroeste de la península de Yucatán.

CLIMA. Esta planicie costera tiene un clima muy variado, por ejemplo, en la parte norte predomina el cálido-semiárido; hacia la porción central, en las cercanías de Tampico, se tiene el tropical lluvioso cálido-subhúmedo y hacia la costa de Veracruz varía de tropical-cálido-subhúmedo a muy cálido-húmedo. La precipitación media anual oscila entre 500 mm al norte hasta 4000 mm en las costas de Tabasco y Veracruz. La temperatura media anual es de 22°C al norte y 26°C al sur.

HIDROGEOLOGÍA. Las Planicies Costeras del Golfo se encuentran cubiertas por una cuña de rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas del Cenozoico. Estos sedimentos descansan sobre las rocas del Mesozoico y tienen un espesor que varía desde unos pocos metros, cerca de sus límites hacia la tierra, a más de 6000 m en la zona costera. Las rocas cenozoicas consisten en su mayoría de arena, limo y arcilla, derivados de la erosión de las zonas continentales altas. En estos sedimentos se han desarrollado muchos acuíferos regionales. Los sedimentos más antiguos de la planicie costera (cretácicos) en México, consisten en rocas de origen marino, con una permeabilidad mínima y regionalmente no contienen acuíferos importantes, debido a:

- la presencia de áreas extensas de depósitos bentoníticos;
- la ocurrencia de material grueso en una matriz de sedimentos de grano fino, y sobre todo;
- al predominio de sedimentos parecidos a los esquistos y areniscas compactas.

La permeabilidad que ocurre en las rocas cenozoicas es muy significativa; el contenido de fluidos es típicamente de agua salada o aceite. Las rocas de la planicie costera se profundizan suavemente hacia el Golfo de México, excepto donde hay rasgos estructurales regionales tales como arcos, fallas, bahías, fosas y levantamientos tectónicos que afectaron la distribución y espesor de los sedimentos. La profundidad, y algunas veces el espesor de los sedimentos, se ve afectada localmente por domos salinos que suben a las profundidades de

los estratos de sal jurásica, los cuales son intrusivos a los sedimentos cenozoicos. El incremento más abrupto de espesor en unidades individuales dentro de distancias cortas está asociado con fallas formadas contemporáneamente con la depositación. Relacionada con el fallamiento regional, existe una zona anormal de alta presión de fluidos (también llamada geopresión) que ha sido desarrollada por sedimentos del Eoceno cercanos a la costa, en algunas partes costeras de Tamaulipas y en la porción norte y noreste de Nuevo León. La alta geopresión o la transición de la presión hidrostática anormal, se considera como la base del flujo del agua subterránea.

La zona de geopresión ha sido típicamente un horizonte de la producción de hidrocarburos y aguas salinas asociadas con el retiro de los hidrocarburos. Normalmente, el agua de la zona de geopresión tiene una temperatura mayor de 100°C y contiene cantidades variantes de metano. La energía concerniente a la década pasada se ha dirigido con una mayor atención a la zona de geopresión y a las aguas que ahí ocurren. La profundidad de esta zona varía desde 2000 m a 4500 m.

El movimiento del agua en la zona de geopresión es lento y los datos de presión indican que generalmente es hacia arriba, donde se encuentra la zona de meteorización. Sin embargo, a causa de la permeabilidad insignificante de los sedimentos, el volumen de agua que fluye fuera de la zona de geopresión es relativamente muy pequeño en relación con el que circula en los sedimentos que contienen aguas meteóricas. La rápida depositación de los sedimentos ha provocado que se hundan poco a poco en la cuenca del Golfo de México, lo que ha dado como resultado un gran volumen de sedimentos compuestos bajo la actual línea costera.

8.- FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA

LOCALIZACIÓN. La región hidrogeológica conocida como Franja volcánica transmexicana, coincide aproximadamente con la provincia fisiográfica del mismo nombre; se localiza en el centro del país, cubre un área de casi 130,000 km² y se extiende parcial o totalmente sobre algunos estados de la República Mexicana, incluyendo el Distrito Federal. Esta región es alargada y de forma irregular, con una longitud de 950 km este-oeste y una anchura de 110 km.

CLIMA. Tiene una gran variedad de condiciones climáticas debido a su topografía montañosa y a su amplio rango de elevaciones. Los climas dominantes son:

- Tropical y húmedo templado en la porción oeste.
- Subhúmedo árido templado en la Mesa Central.
- Frío, húmedo a árido en las áreas montañosas de la porción noreste.

La precipitación oscila entre 300 y 4000 mm/año y está determinada en principio por la orografía; una gran parte de la región recibe más de 500 mm/año y solo en pocas áreas de la porción noreste recibe menos. La precipitación en las regiones montañosas es superior a los 1200 mm/año; la temporada de lluvias es en verano, a principios de otoño y disminuye en invierno, en general, hay un patrón de lluvias aisladas en la región y abundan las heladas en los picos más altos. La temperatura promedio anual varía en relación con la altitud, entre 13°C y 23°C; las temperaturas registradas son menores en las áreas montañosas y aumentan en las partes bajas de la cuenca. En el verano, el promedio de la temperatura diaria tiene rangos de 15°C a 26°C, con altas de 36°C; durante el invierno el promedio de temperatura diaria es de 12°C a 20°C, con bajas de -5°C en las montañas.

Las condiciones anteriores producen valores de evaporación potencial de 1600 a 2000

mm/año, aunque su promedio sea mayor que la precipitación. Hay un exceso de ésta durante la estación de lluvias, las cuales generan flujo y recargas a los acuíferos.

HIDROGEOLOGÍA. Los derrames basálticos y la mayoría de las rocas que se extienden en toda la faja volcánica transmexicana se caracterizan por una alta permeabilidad que varía en un amplio rango, controlado principalmente por su grado de fracturamiento, la presencia de tubificaciones en los derrames y la intercalación de material escoriaáceo.

En el subsuelo de los valles, las rocas consolidadas y no fracturadas abajo del nivel regional de saturación forman barreras para el flujo de agua subterránea, tales como los derrames andesíticos que funcionan como basamento geohidrológico; en el caso de los valles tectónicos, este basamento se puede encontrar a cientos de metros de profundidad. Los derrames de rocas no fracturadas intercaladas con relleno aluvial en diferentes profundidades forman acuíferos locales independientes en rocas adyacentes. En contraste, la mayoría de las rocas de composición riolítica presente en la parte norte de esta región y que se extiende dentro de las cuencas aluviales en el sur, forma acuíferos de gran densidad y de permeabilidad moderada debido a su fracturamiento.

En las partes más bajas de las cuencas, los acuíferos en derrames volcánicos fracturados están cubiertos por depósitos lacustres y aluviales de menor permeabilidad, por lo que son acuíferos confinados o semiconfinados y se caracterizan por un coeficiente de almacenamiento bajo, debido a su virtual incompresibilidad.

Los piroclastos tienen una alta porosidad, aunque su permeabilidad sea baja en la zona de saturación funcionan como acuitardos, los cuales en escala regional, pueden producir o transmitir grandes cantidades de agua a los acuíferos adyacentes. Estos materiales abundan en la base de los volcanes aunque con un espesor menor, son menos porosos y más permeables que los de arriba.

Ampliamente distribuidos en la superficie se encuentran los depósitos lacustres muy porosos y de poca permeabilidad del Plioceno Tardío, que forman acuitardos de algunos metros de espesor y de grandes volúmenes de agua. En un nivel regional, estos depósitos contribuyen al gran volumen de agua de los acuíferos adyacentes, ya sea natural o de bombeo.

Los materiales aluviales no consolidados, gravas, arenas y sedimentos finos están ampliamente expuestos en los valles y forman acuíferos someros. Su permeabilidad y transmisividad varía de acuerdo con el tamaño del grano y del espesor. El coeficiente de transmisividad de los acuíferos aluviales oscila entre 5×10^{-4} y $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. El espesor y la alta permeabilidad de los clásticos son comunes en los arroyos, también forman canales activos y viejos que funcionan como acuíferos semiconfinados. Sobre las extensas llanuras inundadas, los clásticos de granos medios a finos y permeabilidad moderada a baja son más abundantes.

El agua circula preferencialmente a través de los estratos más permeables, los cuales presentan menos resistencia al flujo del agua subterránea y tienden a cruzar los estratos menos permeables por la ruta más corta. Cuando estos estratos se encuentran en la parte superior de la secuencia stratigráfica, la mayoría de las aguas infiltradas se incorporan al sistema local, caso muy frecuente en la Faja volcánica transmexicana. Los flujos de lava basáltica y los gruesos paquetes de piroclásticos que forman el mayor volumen de las rocas volcánicas jóvenes, producen excelentes áreas de recarga y rápidamente transmiten el agua a profundidad, alimentando al acuífero profundo, abajo de los valles adyacentes.

En el subsuelo de los valles y planicies lacustres, el agua se desplaza hacia las áreas de descarga. De acuerdo con las observaciones realizadas y con planteamientos teóricos parece que hay una continuidad hidráulica de la zona saturada, consistente en el relleno, que constituye un sistema de flujo solo, además de que todos los estratos están hidráulicamente

interconectados. No obstante, debido a la heterogeneidad y anisotropía del relleno, hay diferencias significantes en la carga hidráulica, temperatura y calidad del agua en el sentido vertical.

9.- SIERRA MADRE DEL SUR

LOCALIZACIÓN. Esta provincia hidrogeológica toma su nombre de las montañas que son las características fisiográficas más permanentes en la región; cubre un área de 258,274 Km². Limita al norte con la Faja volcánica transmexicana; al sur, con el Océano Pacífico y al oriente, con las provincias de Sierras y Valles del Sureste y con la parte sur de la Planicie costera del Golfo.

CLIMA. Se presenta una variedad de climas acorde con las diferentes latitudes y altitudes que tienen las regiones que integran esta gran provincia. Así se tiene que en las porciones altas de la sierra hay climas templados húmedos y subhúmedos con abundantes lluvias en verano, mientras que hacia las partes bajas, como la zona costera y la cuenca del Balsas, el clima se torna semicálido-húmedo y muy caluroso húmedo; en ambas áreas la precipitación también se presenta en el verano. La precipitación media anual en esta provincia varía de 500 mm/año en la presa del Infiernillo y la Cañada Oaxaqueña, hasta 5000 mm/año en la Sierra de Juárez. La temperatura media anual es también muy variable, pues va de 18°C en las partes altas hasta 26°C en las zonas costeras, con mínimas de 0°C en la zona de Altamirano, Guerrero.

HIDROGEOLOGÍA. La Sierra Madre del Sur es una cadena montañosa compuesta principalmente por un basamento de rocas metamórficas que fueron desplazadas durante el Jurásico y un batolito que constituye el Macizo de Oaxaca. Esta área también sirve de base para otras formaciones impermeables compuestas de dolomías, calizas recristalizadas y lechos rojos compuestos de arcilla, arena y limo del Paleozoico, Triásico y Jurásico.

Por sus rasgos geomorfológicos, esta provincia se ha dividido en dos subregiones que se denominan: la Planicie costera y las Sierras transversales.

La primera es una franja estrecha que abarca desde unos cuantos metros hasta 25 km de ancho y se extiende paralelamente a la línea costera. Está compuesta principalmente de aluvión Cuaternario limoso, derivado de la erosión de la Sierra Madre del Sur y depositado por las corrientes que fluyen al Océano Pacífico. Este aluvión de grano fino constituye acuíferos de baja producción. Algunas de las principales características hidrológicas de las Planicies costeras son las numerosas lagunas que contienen los materiales de grano fino y los abundantes detritos orgánicos. La planicie es un área pantanosa compuesta de sedimentos de grano fino con bajo potencial de almacenamiento de agua subterránea.

Las Sierras transversales contienen las principales rocas permeables de la provincia y, en consecuencia, la mayor ocurrencia de agua subterránea. Están compuestas por una serie de cadenas montañosas y valles. Las montañas están formadas principalmente por calizas y dolomías del Cretácico, las cuales están altamente carstificadas. Las mesetas y valles altos están compuestos de rocas sedimentarias continentales del Terciario, aluvión del Holoceno y gruesos depósitos de sedimentos piroclásticos del Cuaternario. El área de desagüe de estas montañas es complejo debido a los rangos tan amplios de la permeabilidad de las rocas y por las numerosas estructuras tectónicas; comúnmente las corrientes se pierden en las cavidades de las calizas y reaparecen como manantiales que forman magníficas cascadas abajo de las

cordilleras. En otros lugares, la corrientes reaparecen en forma de lagos que sirven como centros de diversión y dan lugar a nacimientos de ríos. Todas estas aguas finalmente drenan a los principales ríos, otras van por la tierra o en forma de flujo subterráneo, hacia la Planicie costera, antes de descargar en el Océano Pacífico. Las calizas y dolomías de esta área tienen un espesor aproximado de 2800 m y consisten en una secuencia alternada de calizas litográficas con pedernal, calizas dolomitizadas, dolomías y calizas arcillosas. La porosidad y permeabilidad son principalmente secundarias, debido al fracturamiento y a la disolución. En algunos sitios las rocas calcáreas están cubiertas por material terrígeno impermeable del Terciario. Esta área sufrió una gran actividad tectónica durante la cual se produjeron horst y grabens.

10.- SIERRAS Y VALLES DEL SURESTE

LOCALIZACIÓN. Esta provincia hidrogeológica comprende una superficie de 84,280 km² y abarca todo el estado de Chiapas y parte de Oaxaca y Tabasco. Limita al norte con la Planicie costera del Golfo, al sur con el Océano Pacífico, al occidente con la Sierra Madre del Sur y al oriente con la frontera de México-Guatemala.

CLIMA. Las condiciones climáticas de esta provincia varían de templado a semicálido húmedo en las partes altas de la sierra de Soconusco y sierras de Chiapas a cálido subhúmedo en las llanuras costeras, así como en la Depresión Central de Chiapas. La temperatura media anual es de 25°C con una mínima de 16°C y una máxima de 40°C. Aunque la época más lluviosa es en el verano, las precipitaciones se presentan casi todo el año. Estas varían de 1000 a 4500 mm/año en el Istmo de Tehuantepec, en la zona de Tacaná y en las sierras pegadas del norte.

HIDROGEOLOGÍA. Esta provincia hidrogeológica es una de las más privilegiadas en cuanto a riqueza hidráulica se refiere, ya que su precipitación pluvial es de las más elevadas del país, además de que cuenta con algunos de los ríos más caudalosos de México como el Grijalva y el Usumacinta. Sin embargo, a pesar de las abundantes lluvias y escurrimientos superficiales, estos se concentran en un período del año y su almacenamiento es fundamentalmente en las partes bajas, que para conducirlos a otras áreas donde se requieren, el costo sería muy grande. Por esto, en extensas áreas de la provincia, los acuíferos son la única opción para cualquier tipo de desarrollo, sea urbano, agrícola o industrial.

En la planicie costera la litología esta representada por arenas, limos y arcillas, derivados principalmente de la erosión de las rocas graníticas. Estos materiales constituyen el acuífero costero y tienen un espesor que varía de 8 a más de 200 m. Tiene como basamento rocas metamórficas y graníticas. El acuífero recibe la recarga directamente de la lluvia o a través de los ríos y arroyos que descienden de las montañas y que descargan sus aguas en el Pacífico.

En la sierra de Chiapas, constituida por un macizo granítico, se presentan condiciones desfavorables para la explotación acuífera, reduciéndose el aprovechamiento de pequeños manantiales originados en zonas de rocas fracturadas. Es la región de mayor precipitación, pero por la baja permeabilidad de sus materiales, el agua escurre por ambos flancos de la sierra a través de arroyos que descienden vertiginosamente hasta la parte de pendiente suave, sitios a donde se lleva a cabo infiltración de gran parte del agua.

La Depresión central del estado de Chiapas es un graben compuesto de rocas

sedimentarias del Mesozoico Superior y del Cenozoico. Tiene una topografía suave hacia el noreste, no así hacia el suroeste, donde empiezan las estribaciones con la sierra de Chiapas. La baja permeabilidad de los sedimentos es la causa de la baja producción de los acuíferos, obteniéndose en pequeñas cantidades. Las diversas perforaciones exploratorias que se han realizado en esta región, han demostrado que las calizas arcillosas del Cretácico Superior no constituyen acuíferos importantes, sirviendo únicamente para abastecer por medio de excavaciones poco profundas las necesidades de agua para usos domésticos de pequeñas comunidades, donde la extracción en general se hace por medios manuales. Más al sur, dentro de la Depresión, los rellenos son de poco espesor, de 2 a 3 m. Y como basamento se tiene al granito, por lo que sus posibilidades acuíferas son prácticamente nulas.

En el altiplano de Chiapas y en las sierras plegadas del norte, hacia las zonas de Ocozocuahtla y Comitán, se han ejecutado varias perforaciones exploratorias en las calizas y dolomías que han resultado con buenos caudales (60-70 l/s) aunque también se han tenido pozos con bajos rendimientos, sin embargo, esto es normal ya que corresponde al comportamiento clásico de los terrenos calcáreos. Hacia las áreas de mayor altura, donde llueve más, se lleva a cabo la recarga de los acuíferos calcáreos que están actualmente en explotación.

La morfología tectónica (morfotectónica) dominante refleja por lo menos dos etapas de plegamiento y fracturamiento que generaron grandes estructuras anticlinales que dan paso a los terrenos calcáreos altos con un gran desarrollo de aparatos cársticos con numerosos "picos", "torres" y "sumideros". Con excepción de las grandes corrientes en lo profundo de los valles, las corrientes menores son escasas y recorren distancias muy cortas para terminar abruptamente en hundimientos o "tragaderos" comunes de "valles ciegos". El flujo del agua subterránea es controlado por el patrón de fracturamiento, originando la descarga principal hacia las corrientes profundas dado este drenaje subterráneo profundo, los niveles del agua se encuentran a bastante profundidad.

11.- PENÍNSULA DE YUCATÁN

LOCALIZACIÓN. La península de Yucatán cubre un área de 136,240 km² en la porción este del país; está limitada en el oeste y norte por el golfo de México; en el este por el mar Caribe; en el suroeste se une con la Planicie costera del Golfo y hacia el sur limita con la Sierra Madre del Sur.

CLIMA. El clima de la península es de cálido a muy cálido y subhúmedo, con variación a cálido semiseco en la porción septentrional, con lluvias que van desde 500 mm/año en el noroeste, a 1300 mm/año en la costa este y 1500 mm/año en la isla de Cozumel, fuera de la costa este; aproximadamente el 90% de la lluvia ocurre en el período de mayo a octubre. La temperatura media anual es de 25°C, siendo la más alta en julio y agosto con 46°C y la más baja en diciembre y enero de 4°C. La alta temperatura y abundante vegetación son causa de que se pierda alrededor del 85% del agua de lluvia por evapotranspiración; el otro 15% se infiltra al subsuelo. Virtualmente, no existen corrientes ni cuerpos de agua superficial en la península.

HIDROGEOLOGÍA. Por sus características hidrológicas y morfológicas, esta provincia se ha subdividido en cuatro regiones que son:

-Planicie cárstica con cenotes al norte

Esta región ocupa la porción norte de la península; desde la línea costera su elevación se incrementa suavemente tierra adentro, hacia el sur, hasta 35 a 40 m cerca de la base de la Sierrita de Ticul. El relieve local alguna vez excede los 10 m. Está área esta formada por carbonatos marinos del Terciario que han estado sujetos a una gran disolución; los grandes orificios de disolución y cavidades se han originado por infiltración de la lluvia y han formado acuífero a altamente permeables. El alto grado de carstificación permite una rápida infiltración y no hay flujos superficiales. En ausencia de la erosión por estas corrientes, existe una fuerte erosión del subsuelo que da como resultado el desarrollo de la topografía cárstica típica. En el subsuelo se presentan ambos tipos de erosión, química y mecánica.

La erosión mecánica ocurre cerca de la superficie donde las arcillas son lavadas, abiertas y depositadas debajo de la superficie calichosa. Las arcillas se encuentran a profundidades de 0.5 a 1.5 m; debajo de la superficie donde son atrapadas por las raíces de las plantas, la rápida infiltración del agua de lluvia en el acuífero da como resultado una agua insaturada, la cual conserva un alto potencial de disolución; éste agranda las fisuras y cavidades, produciendo mayores aberturas y cavernas. El colapso de las rocas produce las dolinas y sumideros conocidos localmente como "cenotes", palabra de origen maya. Estos rasgos cársticos son de varios tipos y se forman en respuesta a las fluctuaciones del nivel freático. Este nivel se presenta a profundidades de 4 a 20 m en las elevaciones superficiales. La mayoría de los cenotes son circulares, con paredes verticales y diámetro cercano a 100 m, donde la profundidad del agua tiene aproximadamente 15 m. Diversos trabajos muestran que los cenotes se estrechan con la profundidad y tienen forma cónica.

Con frecuencia, el techo del cenote se ha derrumbado completamente; en otros casos es semiesférico con pequeñas aberturas de 1 a 3 m de diámetro. Estas típicas aberturas se hacen más grandes con la profundidad y sus diámetros pueden alcanzar algunas decenas de metros; la formación de estos cenotes, así como los otros rasgos cársticos, están en función del nivel freático. A esta profundidad, el agua es cargada con bióxido de carbono promoviendo la formación de ácido carbónico el cual disuelve los carbonatos del subsuelo; varios niveles de disolución señalan que el nivel freático ha fluctuado aparentemente en respuesta a la emergencia gradual de la península. En la parte norte de ésta, los carbonatos del Terciario están horizontales y muestran significativos cambios de facies, los cuales controlan la ocurrencia de zonas de diferentes grados de carstificación. Los cenotes o sumideros ocurren a lo largo de grandes longitudes de la península, pero son más notables y numerosos en ciertas zonas, donde una faja alargada se caracteriza por abundantes rasgos cársticos, especialmente de gran tamaño.

-Planicie cárstica montañosa del sur

En esta zona la topografía es variada; existen formas aisladas de bajo relieve, cerros con formas cársticas cónicas de aproximadamente 40 m de altitud en relación con la superficie que los rodea. La altitud máxima de esta región es de 300 msnm.

La planicie está formada por carbonatos del Eoceno incluyendo calizas, calizas dolomíticas y dolomías. Algunos de los carbonatos presentan un ligero grado de silicificación. Los estratos se presentan desde formas horizontales hasta pequeños pliegues con inclinación de 15° a 20° y se encuentran altamente fracturados.

La alta permeabilidad de estos carbonatos fracturados refleja un bajo gradiente en el nivel freático. En algunos lugares, dicho nivel se encuentra a 100 m de profundidad haciendo difícil y costosa la explotación del agua subterránea. Por esta razón hay pocos pozos privados o no existen debido a la alta topografía y profundidad de los acuíferos.

La presencia de rocas evaporíticas que se localizan aflorando en la porción central, al sur de la península, propicia acuíferos con agua de mala calidad que son descargados siguiendo el patrón estructural regional hacia las zonas externas, mezclándose con agua de mejor calidad, "contaminando" a éstas, como al parecer ocurre hacia las zonas de Calkiní y Tenabo en Campeche y la de Polyuc en Quintana Roo.

-Sierrita de Ticul

Entre las extensas planicies del norte de la península y las sierras del sur se presenta una forma topográfica alta conocida como Sierrita de Ticul. Está constituida por calizas del Eoceno, de orientación noroeste a sureste; tiene 160 km de longitud y 15 km de ancho. La Sierrita es un escarpe de falla formada por una falla normal, en la que el bloque caído es el norte. La altitud en la región es de 150 msnm y de 100 a 110 m, en relación con la planicie del norte. Las elevaciones a lo largo del escarpe son prácticamente los únicos rasgos geomórficos que interrumpen el paisaje característico de la península.

-Región de bloque afallados del este

Esta área, de aproximadamente 80 km de ancho, se extiende desde Cabo Catoche, en la parte noroeste de la península hasta el sur, en el límite con la República de Belice. En esta región las rocas carbonatadas se deben a una serie de fallas normales con tendencia nortenoeste (Falla de río Hondo) formando horst y grabens, las fallas varían en longitud y desplazamiento y algunas se pueden observar en la superficie.

La expresión más notable de estas fallas a lo largo de la costa caribeña, incluyendo la isla de Cozumel, es un bloque limitado al este y oeste por grandes fallas. Cerca de la costa existe una marcada orientación y alimentación de las bahías como Chetumal y la de la Ascensión. Ligeramente al interior, existen depresiones alargadas de 10 a 15 m de profundidad que forman lagos y regiones pantanosas. Buenos ejemplos de estas grandes depresiones son los lagos de Bacalar, orientados noroeste-sureste y noreste-suroeste y que fueron formados por la caída de bloque de 8 a 10 m. Abajo de la superficie que los rodea, estos lagos varían en lo ancho desde los más pequeños, de 2 a 10 m hasta los de 50 km de longitud. Más al noroeste, cerca de la costa, rasgos similares pero más pequeños se presentan a pocos metros sobre el nivel del mar, formando pantanos y pequeños lagos. En la zona costera el agua subterránea descarga en el mar Caribe disolviendo los carbonatos y formando caletas y lagunas.

2.2 EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO

Un análisis de la información existente referente a las explotaciones subterráneas en México muestra la existencia de más de 300 mantos acuíferos principales. Se presentan en la Tabla 2.1. La distribución espacial de éstos en el país se muestra en la ilustración 2.2.

Lamentablemente la información de las condiciones de la mayoría de los mantos acuíferos es bastante pobre, y en algunos casos inexistente, además de que en general los estudios geohidrológicos de las explotaciones datan de los años de 1973-1980, y en mínimas ocasiones se cuenta con estudios recientes de las condiciones tanto cuantitativas como cualitativas de éste recurso; no debería de presentarse este problema dada la importancia de las explotaciones subterráneas.

EXPLORACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO

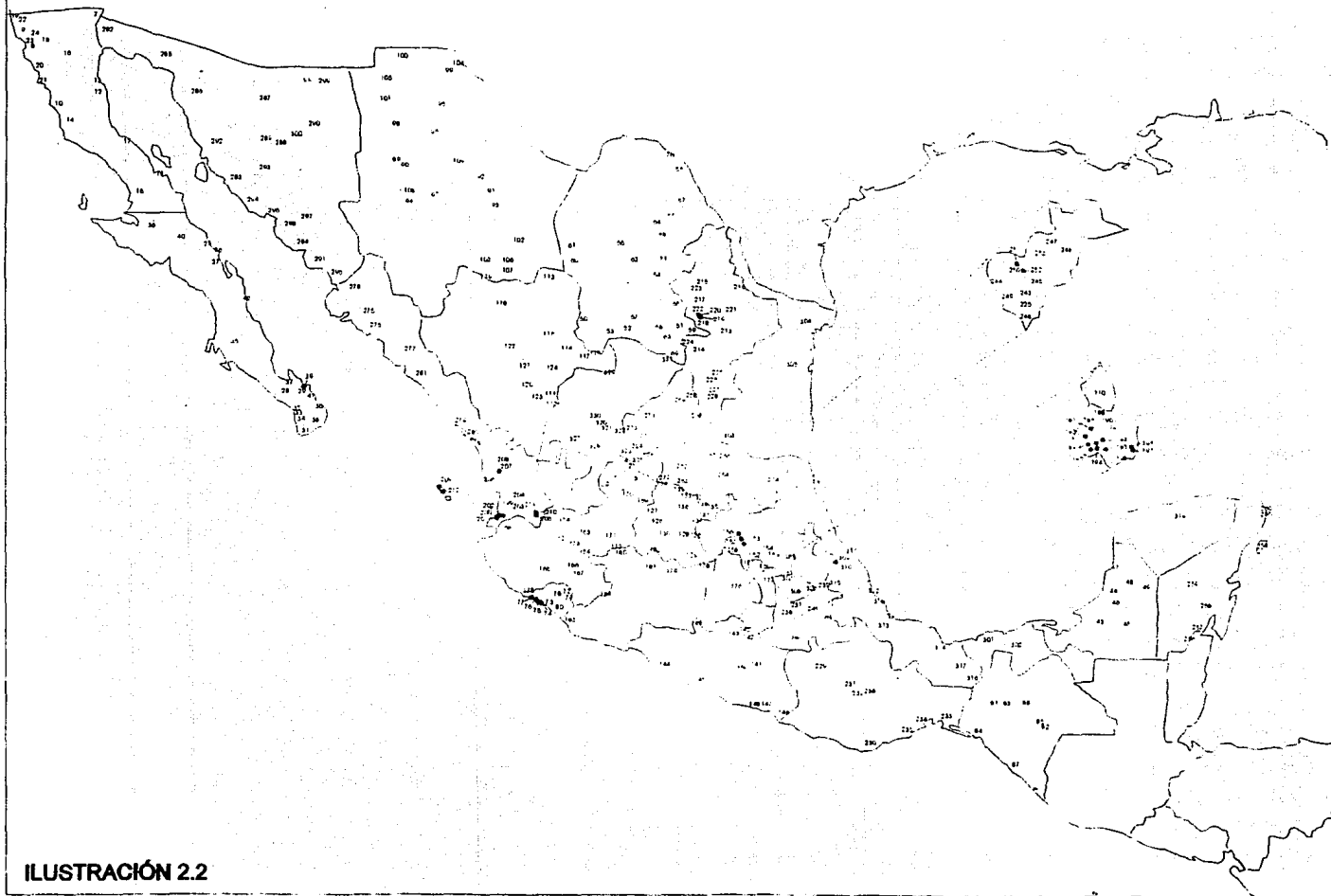


ILUSTRACIÓN 2.2

TABLA 2.1 EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO

No	Explotación subterránea	Estado	Región Geohid.	Area aprox. de explotación (Km ²)
1	V. de Aguascalientes	Ags.	XII	1500
2	V. de Chicalote	Ags.	XII	300
3	V. de Calvillo	Ags.	XII	300
4	Tepezala	Ags.	XII	150
5	El Llano	Ags.	XII	300
6	V. de Venadero	Ags.	XII	70
7	V. de Mexicali	Baja Cal. Nte.	I	5500
8	V. de Manadero	Baja Cal. Nte.	I	33
9	V. de La Misión	Baja Cal. Nte.	I	7
10	V. de San Quintín	Baja Cal. Nte.	I	222
11	Bahía de los Angeles	Baja Cal. Nte.	I	30
12	V. de San Pedro Mártir-V. Chico	Baja Cal. Nte.	I	1492
13	San Felipe-Valle Punta Estrella	Baja Cal. Nte.	I	664
14	V. de Rosario	Baja Cal. Nte.	I	
15	V. de Jesús María	Baja Cal. Nte.	I	30
16	La Trinidad	Baja Cal. Nte.	I	70
17	San Luis Gonzaga	Baja Cal. Nte.	I	183
18	Ojos Negros-Real del Castillo	Baja Cal. Nte.	I	64
19	Los Médanos-El Descanso(Tijuana)	Baja Cal. Nte.	I	5
20	San Rafael-Punta Colnet	Baja Cal. Nte.	I	45
21	San Telmo	Baja Cal. Nte.	I	34
22	Las Palmas	Baja Cal. Nte.	I	39
23	Ensenada	Baja Cal. Nte.	I	
24	Guadalupe	Baja Cal. Nte.	I	85
25	Arroyo Sta. Agueda	Baja Cal. Sur	I	72
26	San Bruno	Baja Cal. Sur	I	245
27	Mulegé	Baja Cal. Sur	I	144
28	El Carrizal	Baja Cal. Sur	I	532
29	El Triunfo-San Antonio	Baja Cal. Sur	I	24
30	Santiago-Rivera-Cuevas	Baja Cal. Sur	I	23

TABLA 2.1 EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO (CONTINUACIÓN)

No	Explotación subterránea	Estado	Región Geohid.	Área aprox. de explotación (Km ²)
31	Cabo San Lucas	Baja Cal. Sur	I	144
32	Todos Santos	Baja Cal. Sur	I	155
33	El Pescadero	Baja Cal. Sur	I	72
34	Plutarco Elías Calles	Baja Cal. Sur	I	43
35	Sto. Domingo	Baja Cal. Sur	I	1000
36	Vizcaíno	Baja Cal. Sur	I	70
37	La Paz-Centenario	Baja Cal. Sur	I	187
38	San José del Cabo	Baja Cal. Sur	I	460
39	San Juan de Los Planes	Baja Cal. Sur	I	230
40	San Ignacio	Baja Cal. Sur	I	
41	San Bartolo	Baja Cal. Sur	I	
42	Loreto	Baja Cal. Sur	I	58
43	Fco. Escárcega	Campeche	VII	1000
44	Champotón	Campeche	XI	700
45	Nvo. Zináparo	Campeche	XI	200
46	Yohaltum	Campeche	XI	150
47	Campeche-Calkani	Campeche	XI	
48	V. de Edzná-A. V: Bonfil	Campeche	XI	245
49	Zona de los Chenes	Campeche	XI	
50	Región Lagunera	Coahuila	V	2500
51	Saltillo-Ramos Arizpe	Coahuila	V	718
52	Parras	Coahuila	V	
53	Viesca	Coahuila	V	
54	Monclova-Castaños	Coahuila	V	3000
55	Ocampo	Coahuila	V	
56	Palestina	Coahuila	VII	
57	La Paila	Coahuila	V	4700
58	General Zepeda	Coahuila	V	
59	Zona manzanera	Coahuila	V	335
60	Laguna del Rey	Coahuila	V	

TABLA 2.1 EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO (CONTINUACIÓN)

No	Explotación subterránea	Estado	Región Geohid.	Área aprox. de explotación (Km ²)
61	Sierra Mojada	Coahuila	V	-
62	Cuatro Ciénegas	Coahuila	V	1523
63	Cañón de Derramadero	Coahuila	V	700
64	Zona Carbonífera	Coahuila	V	1000
65	Paredón	Coahuila	V	1052
66	Cloete	Coahuila	V	-
67	Allende	Coahuila	VII	-
68	San José Aura	Coahuila	V	-
69	Los Angeles	Coahuila	V	-
70	Acuña	Coahuila	V	-
71	Nadadores	Coahuila	V	-
72	Valle de Colima	Colima	IX	184
73	Venustiano Carranza	Colima	IX	77
74	El Colomo (Manzanillo)	Colima	IX	62
75	Jalapa-Tepeixtles	Colima	IX	70
76	Santiago-Salahua	Colima	IX	68
77	La Central	Colima	IX	60
78	Pueblo Juárez	Colima	IX	-
79	Los Tepames	Colima	IX	-
80	Armería-Tecoman-Periquillos	Colima	IX	548
81	Ocozocoutla-Cintalapa	Chiapas	X	600
82	Comitán-Montebello	Chiapas	X	500
83	Tuxtla Gtz.	Chiapas	X	-
84	Arriaga-Tonalá	Chiapas	X	747
85	Trinitaria	Chiapas	X	810
86	Soconusco	Chiapas	X	2600
87	Planicie Costera del Pacífico	Chiapas	X	300
88	San Cristóbal de las Casas	Chiapas	X	-
89	Alta Babicora	Chihuahua	III	1152
90	Baja Babicora	Chihuahua	III	576

TABLA 2.1 EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO (CONTINUACIÓN)

No	Explotación subterránea	Estado	Región Geohid.	Área aprox. de explotación (Km ²)
91	Nombre de Dios	Chihuahua	III	-
92	Villa Aldama	Chihuahua	IV	1550
93	D. de R. de Dificias-Meoqui	Chihuahua	III	600
94	Papigochic	Chihuahua	III	-
95	C. del Río del Carmen (V. Ahumada)	Chihuahua	IV	600
96	C. del Río del Carmen (Flores Magón)	Chihuahua	IV	3200
97	Cuahtémoc	Chihuahua	III	2300
98	San Buenaventura	Chihuahua	III	866
99	Samalayuca	Chihuahua	IV	1948
100	Palomas	Chihuahua	IV	1400
101	Casas Grandes-Janos	Chihuahua	III	2349
102	Jiménez-Camargo	Chihuahua	IV	1888
103	Parral	Chihuahua	IV	50
104	Valle de Juárez	Chihuahua	IV	272
105	Ascención	Chihuahua	IV	800
106	Villa López	Chihuahua	IV	1000
107	Villa Coronado	Chihuahua	IV	10
108	Mesa Miñaca	Chihuahua	III	30
109	El Sauz	Chihuahua	IV	2000
110	C. del V. de México	D. F.	VIII	5088
111	Vicente Guerrero-Poanas	Durango	III	900
112	Suchil	Durango	III	-
113	V. de Ceballos	Durango	V	80
114	Cuencamé	Durango	VI	-
115	La Fé	Durango	VI	-
116	Rodeo-Nazas	Durango	VI	550
117	Oriente Aguanaval	Durango	VI	1795
118	El Oro	Durango	V	-
119	Villa Ocampo	Durango	III	-
120	V. de Guadiana	Durango	III	700

TABLA 2.1 EXPLOTACIONES SUBTERRANEAS EN MEXICO (CONTINUACIÓN)

No	Explotación subterránea	Estado	Región Geohid.	Area aprox. de explotación (Km ²)
121	Canatlán	Durango	III	23000
122	Santiagoullo	Durango	III	500
123	Mezquital	Durango	III	20
124	Fco. I. Madero	Durango	III	1076
125	V. de Apaseo	Guanajuato	III	444
126	V. de Pénjamo	Guanajuato	III	1183
127	Vallas de León y Río Turbio	Guanajuato	III	2115
128	Valle de Celaya	Guanajuato	VIII	700
129	Zona de riego presa Solís	Guanajuato	VIII	3100
130	Irapuato	Guanajuato	VIII	213
131	Dr. Mora	Guanajuato	III	400
132	Laguna Seca	Guanajuato	III	920
133	San Diego de la Unión	Guanajuato	III	460
134	San Felipe Torres Mochas	Guanajuato	III	1786
135	Victoria	Guanajuato	VI	6
136	Dolores Hidalgo	Guanajuato	III	1110
137	San Miguel de Allende	Guanajuato	III	250
138	San Luis de la Paz	Guanajuato	III	130
139	Jaral de Berrio	Guanajuato	III	350
140	Iguala	Guerrero	IX	20
141	Chilapa	Guerrero	IX	70
142	Huitzucu	Guerrero	IX	4
143	Cocula	Guerrero	IX	5
144	San Jeronimito	Guerrero	IX	50
145	Tecpan-Atoyac	Guerrero	IX	100
146	Cuajinicuilapa	Guerrero	IX	700
147	Valle Río Copala	Gurrero	IX	480
148	Valle Río Nexpa	Guerrero	IX	600
149	V. de Altamirano	Guerrero	IX	2000
150	Chilpancingo	Guerrero	IX	7

TABLA 2.1 EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO (CONTINUACIÓN)

No	Explotación subterránea	Estado	Región Geohid.	Area aprox. de explotación (Km ²)
151	Tepeji del Río	Hidalgo	VIII	
152	V. de Mezquital	Hidalgo	VIII	2000
153	Ixmiquilpan	Hidalgo	V	
154	Actopan	Hidalgo	VIII	
155	Tulancingo	Hidalgo	VII	1050
156	Tecoautla	Hidalgo	VI	1100
157	San Miguel Caltepeantla	Hidalgo	VI	115
158	El Astillero	Hidalgo	VIII	49
159	Pachuca	Hidalgo	VIII	
160	Tizayuca	Hidalgo	VIII	
161	Apan	Hidalgo	VIII	
162	V. de Ameca-Ahuáulco	Jalisco	VIII	2500
163	Atemajac-Tesistán (Guadala-jara)	Jalisco	VIII	2700
164	Ciénega de Chapala	Jalisco	VIII	400
165	El Grullo-Autlán	Jalisco	IX	1350
166	Sayula	Jalisco	VIII	
167	Ciudad Guzmán	Jalisco	VIII	
168	V. de Banderas	Jalisco	IX	972
169	Lagos de Moreno	Jalisco	III	800
170	Encarnación de Díaz	Jalisco	III	
171	V. de Ocotlán	Jalisco	VIII	1400
172	La Barca-Yurécuaro	Jalisco	VIII	1000
173	San Marcos	Jalisco	VIII	1100
174	Tequila	Jalisco	III	800
175	Costera de Jalisco	Jalisco	IX	175
176	V. de Toluca-Iztlahuaca	Edo. de Méx.	VIII	2085
177	Texcoco	Edo. de Méx.	VIII	
178	V. de Maravatío	Michoacán	VIII	50
179	Morelia-Queréndaro	Michoacán	VIII	2500
180	Zamora	Michoacán	VIII	550

TABLA 2.1 EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO (CONTINUACIÓN)

No	Explotación subterránea	Estado	Región Geohid.	Área aprox. de explotación (Km ²)
181	Zacapu	Michoacán	VIII	.
182	Pastor Ortíz	Michoacán	VIII	92
183	Coahuayana	Michoacán	IX	1500
184	Tepalcatepec	Michoacán	VIII	.
185	Zacatepec	Morelos	IX	353
186	V. de Cuernavaca	Morelos	IX	220
187	Temixco	Morelos	IX	.
188	Tepoztlán	Morelos	IX	.
189	Puente de Ixtla	Morelos	IX	.
190	Oacalco	Morelos	IX	233
191	Cuautla	Morelos	IX	449
192	Coatetelco	Morelos	IX	258
193	Huatecalco	Morelos	IX	10
194	Tlalench	Morelos	IX	18
195	Marcelino Rodríguez	Morelos	IX	60
196	Tehuixtla	Morelos	IX	60
197	Atlahualoilla	Morelos	IX	15
198	Río Chinameca	Morelos	IX	.
199	Las Varas	Nayarit	III	.
200	Guayabitos	Nayarit	II	.
201	San Fco.	Nayarit	II	.
202	Punta Rosa	Nayarit	II	.
203	Compostela	Nayarit	III	86
204	Matatipac (Tepic)	Nayarit	III	230
205	Ixtlán del Río	Nayarit	VIII	27
206	Chilapa	Nayarit	II	.
207	Rosa Morada	Nayarit	II	.
208	Tierra Generosa	Nayarit	III	.
209	Rehilete-I. María Madre	Nayarit	II	.
210	Heriberto Jara	Nayarit	VIII	57

TABLA 2.1 EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO (CONTINUACIÓN)

No	Explotación subterránea	Estado	Región Geohid.	Area aprox. de explotación (Km ²)
211	Chapallilla	Nayarit	III	15
212	Pto. Balleto-I. María Madre	Nayarit	II	
213	Monterrey-Linares	Nuevo León	V	2700
214	Cuije-El Potosí-Rafces	Nuevo León	V	1000
215	Valles Intermontanos	Nuevo León	V	1400
216	Vallecillos-Los Ramones	Nuevo León	VII	1500
217	Campo Mina	Nuevo León	V	40
218	Campo Buenos Aires-Ampliación Campo Buenos Aires	Nuevo León	V	68
219	Campo Metropolitano	Nuevo León	V	25
220	Campo Topo Chico	Nuevo León	V	20
221	Campo Papagayos	Nuevo León	VII	85
222	Campo El Durazno	Nuevo León	V	20
223	Campo Jarita	Nuevo León	V	20
224	El Prado	Nuevo León	V	20
225	Puerto Bajo	Nuevo León	V	100
226	Sandía El Grande	Nuevo León	V	150
227	La Zorra	Nuevo León	V	20
228	Tanquecillos	Nuevo León	IX	20
229	Región Mixteca	Oaxaca	IX	675
230	Planicie Costera del Golfo de México	Oaxaca	IX	
231	Valle de Etla	Oaxaca	IX	300
232	Valle de Zimatlán	Oaxaca	IX	350
233	Río Ostuta	Oaxaca	X	350
234	Zona Tehuantepec	Oaxaca	IX	460
235	Zona Chontal	Oaxaca	IX	200
236	Valle de Tlaxiaco	Oaxaca	IX	200
237	Valle de Puebla-Atoyac	Puebla	IX	750
238	Atlixco-Matamoros	Puebla	IX	990
239	Cuenca Cda. de Oriental	Puebla	VIII	3000
240	Chinantla-Ahuehuetitla	Puebla	IX	50

TABLA 2.1 EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO (CONTINUACIÓN)

No	Explotación subterránea	Estado	Región Geohid.	Área aprox. de explotación (Km ²)
241	Tepuaca-Valsequillo	Puebla	IX	1800
242	V. de Palmar de Bravo	Puebla	IX	-
243	San Juan del Río	Querétaro	III	625
244	Querétaro	Querétaro	III	304
245	Tequisquiapan	Querétaro	VI	200
246	Amealco	Querétaro	VIII	30
247	Peñamiler	Querétaro	V	-
248	San Joaquín	Querétaro	V	-
249	Huimilpan	Querétaro	VIII	40
250	Amascala	Querétaro	III	100
251	Alfajayucan	Querétaro	III	35
252	Valle el Lobo	Querétaro	III	30
253	Tolimán	Querétaro	V	12
254	Isla de Cozumel	Quintana Roo	XI	150
255	Agua Potable Cancún	Quintana Roo	XI	5
256	Alvaro Obregón	Quintana Roo	XI	200
257	Ucum-Noch Bec (Chetumal)	Quintana Roo	XI	200
258	Lázaro Cárdenas	Quintana Roo	XI	2000
259	Tampak	Quintana Roo	XI	500
260	Sist. agua Potable Isla Mujeres	Quintana Roo	XI	3
261	Villa de Arista	S. Luis Potosí	V	3900
262	V. de San Luis Potosí	S. Luis Potosí	VI	1200
263	V. de Villa de Reyes	S. Luis Potosí	VI	1900
264	Río Verde	S. Luis Potosí	V	2400
265	Cerritos	S. Luis Potosí	V	-
266	Palomas	S. Luis Potosí	V	-
267	Matehuala-Hiuzache (San Francisco-La Masita)	S. Luis Potosí	V	-
268	Cedral	S. Luis Potosí	V	-
269	El Salado-Wadley	S. Luis Potosí	V	-
270	Villa Ramos	S. Luis Potosí	VI	-

TABLA 2.1 EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO (CONTINUACIÓN)

No	Explotación subterránea	Estado	Región Geohid.	Área aprox. de explotación (Km ²)
271	Sto. Domingo	S. Luis Potosí	VI	
272	Villa de Arriaga	S. Luis Potosí	VI	1200
273	El Barril	S. Luis Potosí	VI	3000
274	Región Huasteca	S. Luis Potosí	VII	
275	M. D. del río Sinaloa	Sinaloa	II	950
276	M.I. del Río Sinaloa	Sinaloa	II	1600
277	Río Culiacán	Sinaloa	II	580
278	San Blas-El Fuerte	Sinaloa	II	350
279	Río Presidio (Mazatlán)	Sinaloa	II	50
280	El Pozole	Sinaloa	II	40
281	M. I. del río San Lorenzo	Sinaloa	II	310
282	San Luis Colorado (Mesa Arenosa)	Sonora	II	180
283	Costa de Hermosillo	Sonora	II	960
284	Río Yaqui (Ciudad Obregón)	Sonora	II	2054
285	Sonoita-Puerto Peñasco	Sonora	II	4000
286	Caborca	Sonora	II	630
287	Magdalena	Sonora	IV	
288	Río San Miguel	Sonora	II	
289	Río Zanjón	Sonora	II	
290	Río Moctezuma	Sonora	III	56
291	Río Mayo	Sonora	II	960
292	San Ignacio	Sonora	II	2884
293	Hermosillo	Sonora	II	
294	Sahuaral	Sonora	II	210
295	Guaymas	Sonora	II	700
296	Fuerte Mayo	Sonora	II	1687
297	Agua Caliente	Sonora	III	1000
298	Las Guasimas	Sonora	II	40
299	Agua Prieta	Sonora	IV	1500
300	Río Sonora	Sonora	III	2000
301	La Chontalpa	Tabasco	VII	600

TABLA 2.1 EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO (CONTINUACIÓN)

No	Explotación subterránea	Estado	Región Geohid.	Área aprox. de explotación (Km ²)
302	Villahermosa (Frontera)	Tabasco	VII	680
303	Tula	Tamaulipas	V	700
304	Bajo Río Bravo	Tamaulipas	VII	7000
305	Nvo. Laredo-Reynosa-Tampico	Tamaulipas	VII	
306	Huamantla-Cupiactla	Tlaxcala	VIII	700
307	Valle de Soltepec	Tlaxcala	VIII	300
308	Atoyac-Zahuapan (Apizaco-Zacatelco)	Tlaxcala	VIII	1600
309	V. de Palma Sola	Veracruz	VII	
310	V. De Martínez de la Torre	Veracruz	VII	
311	Tecolutia	Veracruz	VII	
312	Planicie Costera de Veracruz	Veracruz	VII	915
313	Los Naranjos (Córdoba)	Veracruz	VII	6000
314	Costera del Río Coatzacoalcos	Veracruz	VII	2223
315	Salayeta	Veracruz	VIII	200
316	Cerro De Oro	Veracruz	X	4000
317	Parte baja de la cuenca del río Uspanapa	Veracruz	X	
318	Cuenca del río Jamapa-Cuenca del Río Cotaxtla	Veracruz	VII	600
319	Planicie Yucateca	Yucatán	XI	5000
320	V. de Fresnillo	Zacatecas	VI	
321	V. de Calera	Zacatecas	VI	675
322	V. de Chupaderos-Villa de Coss	Zacatecas	VI	1000
323	V. de Ojo Caliente	Zacatecas	VI	510
324	V. La Blanca	Zacatecas	VI	770
325	Valle Loreto	Zacatecas	VI	350
326	Villa Hidalgo	Zacatecas	VI	1350
327	V. de Valparaíso	Zacatecas	III	
328	V. de Jerez	Zacatecas	III	800
329	Zona Ixtlera	Zacatecas	VI	
330	Cuenca media de Aguanaul	Zacatecas	VI	1400
331	V. de Cedros	Zacatecas	VI	

2.2.1 PRINCIPALES EXPLOTACIONES ACUÍFERAS EN MÉXICO

Para el análisis de las condiciones generales del agua subterránea, se escogieron los 20 principales acuíferos de México tomando en cuenta su importancia regional, económica y social, así como su extracción anual por área de explotación (ver Tabla 2.2).

TABLA 2.2 PRINCIPALES ACUÍFEROS DE MÉXICO

Zona de Explotación	Recarga anual Mm ³	Descarga anual Mm ³	Diferencia de almacenamiento	Región Geohidrológica
Aguascalientes, Ags.	235	454	-219	III
Valle de las Palmas, B.C.	6	8	-2	I
Valle de San Quintín, B.C.	33	45	-12	I
Valle del Vizcaíno, B.C.S.	7	10	-3	I
Región Lagunera, Coah.		600	-750	V
Valle de Juárez, Chih.		200	-123	IV
Jiménez-Camargo, Chih.	224	238	-14	IV
Distrito Federal	620	1085	-465	VIII
Valle de León y Río Turbio, Gto.	80	156	-76	III
Tesistán-Atemajac, Jal.	141	85		VIII
Morelia-Queréndaro, Mich.	118	78		VIII
V. de Cuernavaca, Mor.		248	-1	IX
San Juan del Río- Tequisquiapan-Querétaro, Qro.	405	539	-134	VI
Valle de San Luis Potosí, S.L.P.	33	35	-2	VI
Valle de Caborca, Son.	273	563	-290	II
Río Sonora, Son.	180	135		III
Costa de Hermosillo, Son.	350	900	550	II
Valle de Guaymas, Son.		200	-80	II
Río Yaqui, Son.		350		II
Planicie Yucateca, Yuc.		250		XI

Es importante mencionar que, dado que para cada región estudiada se mencionan las características geohidrológicas principales, al describir la importancia de los acuíferos principales, no se analizarán dichas características, enfocando la descripción de las explotaciones subterráneas principalmente al estudio hacia la calidad de las aguas de cada

acuifero.

1.- VALLE DE AGUASCALIENTES

Alojado en el subsuelo del Estado de Aguascalientes, el acuífero homónimo es el más grande e importante de la entidad. Se ubica en la provincia geohidrológica III y en la región hidrológica de Lerma-Santiago.

El problema más grave del valle es la sobreexplotación a que ha estado sometido en las últimas décadas, que es del orden de $219 \times 10^6 \text{ m}^3$ [4].

Aunque no se dispone de información suficiente para emitir un juicio plenamente fundamentado, respecto a la variación de la calidad de las aguas subterráneas en su estricto proceso cronológico, es razonable suponer que en el transcurso de las últimas cuatro o cinco décadas, ha sido deteriorado en cierto grado por las actividades humanas, ya que con toda seguridad, las infiltraciones al subsuelo de excedentes de riego y descargas de aguas residuales, han aportado a los acuíferos cantidades importantes de sales en solución, derivadas de las prácticas agrícolas, y diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos generados en los efluentes de las áreas urbanas e industriales.

La salinidad total en la parte sur del valle de Aguascalientes varía entre 400 y 700 ppm, los iones predominantes son el bicarbonato, el sodio y el calcio, cuyo origen son los feldespatos sódicos y cálcicos, que el agua subterránea diluye y arrastra en su curso a través de las rocas ígneas o de los sedimentos derivados de ellas.

No obstante que la infiltración de los efluentes de algunas instalaciones pecuarias, han contaminado localmente los acuíferos, es posible aseverar que las fuentes principales de contaminación son los retornos urbanos, industriales y agrícolas, pero a pesar de éstas, las aguas subterráneas siguen siendo por su calidad, aptas en lo general para todo uso, y como además la presencia de sales de origen natural no ha alcanzado concentraciones de riesgo, las aguas del subsuelo cumplen, en cuanto a su contenido de iones principales, con las normas de calidad para el consumo humano.

La incipiente contaminación de los acuíferos en la porción sur del Valle de Aguascalientes, originada por la infiltración de las descargas residuales de la zona urbano-industrial, va en continuo aumento, pero además, el gradiente hidráulico se ha invertido; el agua que antes fluía subterráneamente rumbo al sur, ahora, bajo los efectos del bombeo, circula en sentido contrario, contribuyendo a la degradación del agua en la misma zona que genera la contaminación y, de no tomarse medidas correctivas, el líquido que abastece a la Capital del Estado, podría llegar a sufrir grave deterioro en su calidad.

La ciudad de Aguascalientes sigue siendo considerada como un polo de desarrollo, sin tomar en cuenta sus posibilidades de abastecimiento de agua, ya que las directrices de la planeación regional, no reconocen las limitaciones que impone la deficiencia de los acuíferos, pero al ignorarlas se pone en grave riesgo las cuantiosas inversiones que se destinan a la infraestructura de los nuevos asentamientos, ante la probable ocurrencia de un futuro próximo, de una aguda situación de escasez, que podría dar lugar a conflictos de orden social o al enfrentamiento de los sectores usuarios, por el aprovechamiento de la única fuente de agua que existe en el lugar.

Además de todo esto, el acuífero se encuentra en una de las regiones hidrológicas más contaminadas del país (la segunda más contaminada, después del Pánuco; Demanda Bioquímica de Oxígeno total de $319'975,409 \text{ kg/año}$ y gasto residual de $18,773 \text{ l/s}$), lo cual contribuye en forma indirecta al deterioro de los mantos acuíferos [5].

2.- VALLE DE LAS PALMAS

Este valle se localiza en la parte noroccidental del estado de Baja California Norte, cubriendo una superficie hidrográfica de cuenca de 2,298 km² y pertenece a la provincia geohidrológica I. El valle de Las Palmas, propiamente dicho, está formado por el acarreo del arroyo del mismo nombre, tiene una extensión acuífera de 39 km² entre el Cañon de Cancio y el Rancho de Santa Alicia en su zona de salida. El bombeo mediante pozos constituye la forma principal de descarga ($8 \times 10^6 \text{ m}^3$) con una recarga de $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ lo que provoca que se tomen del almacenamiento subterráneo $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ por año [6].

En cuanto a la calidad del agua para riego, en su mayoría es de clase C3-S1, la cual corresponde a agua altamente salina, con bajo contenido de sodio intercambiable. Puede usarse para riego en suelos con buen drenaje y requiere algunos lavados de suelo; una minoría es de clase C4-S2, correspondiente a agua muy altamente salina y con medio contenido de sodio intercambiable.

Las normas de calidad para agua potable, indican que esta debe tener menos de 1000 ppm de sólidos totales disueltos, pero en lugares donde no se encuentra agua de buena calidad, se tiene que recurrir al uso de agua que sobrepasa la norma de calidad.

Para el agua subterránea del valle de Las Palmas, en el 33% de las muestras que se analizaron según el estudio geohidrológico del valle [7], tenían menos de 1000 ppm de sólidos disueltos siendo ésta de muy buena calidad y utilizable como potable. El 44%, concentraciones de sólidos totales disueltos, que varían de 1000 a 2000 ppm y se consideran como de mediana calidad y utilizables como potable, a falta de otra mejor calidad y el 18% restante, contenían más de 2000 ppm de sólidos totales disueltos, por lo cual no se consideran apropiados para usos domésticos.

3.- VALLE DE SAN QUINTÍN

La cuenca del Valle de San Quintín está ubicada en la porción centro occidental del estado de Baja California Norte, donde cubre una superficie de 2637 km². De esta superficie, 222 km² forman una planicie costera que ha sido denominada como valle de San Quintín [6].

Este valle ha sido desde hace casi 40 años, uno de los principales productores agrícolas del estado. Este desarrollo agrícola ha sido posible gracias a la explotación de aguas subterráneas por medio de obras de explotación que con el tiempo se han incrementado en número [8].

Hace 10 años comenzaron a presentarse síntomas de sobreexplotación detectada en el aumento de la salinidad en obras cercanas a la costa y abatimientos en los niveles estáticos del valle.

El valle de San Quintín, sobreexplotado en 12 millones de metros cúbicos anuales, no presenta un avance franco de la intrusión salina debido a la presencia de una frontera impermeable que protege la porción central del valle, donde existe un promedio de sólidos totales disueltos de 1500 ppm.

La invasión de agua salada se manifiesta en los extremos norte y sur del valle, a la altura de los cañones de Padre Quino y San Simón, respectivamente. En la primera zona, las concentraciones de sólidos totales disueltos alcanzan hasta 4000 ppm y en la segunda hasta 8000 ppm.

De continuar con el régimen de extracción actual, además de seguir provocando la invasión de agua de mar, el abatimiento progresivo de los niveles incrementará notablemente los costos de bombeo y el rendimiento de las captaciones será muy deficiente. Para que la

operación de los pozos sea más o menos eficiente se requiere un espesor mínimo de saturación, el cual, en este caso, es de unos 15 m , ya de por sí muy reducido.

Las normas de calidad para agua potable, respecto a los sólidos totales disueltos, era de 1000 ppm en 1974. En el área de estudio se sobrepasaba ya este límite en la mayoría de los casos.

Las muestras que tienen más de 1000 ppm de sólidos totales disueltos, de acuerdo a las normas de calidad deben usarse como potables, pero esta norma es elástica y en lugares donde no existe agua de mejor calidad, es consumida la que tiene hasta 2000 ppm de sólidos disueltos.

En el valle de San Quintín, según la ref. [8], en el 64% de los casos analizados es de calidad para uso potable y el resto contiene más de 2000 ppm de sólidos disueltos, no considerándose propicia para usos domésticos.

Con respecto al riego, se menciona que el agua tiene un alto contenido de sales y representando esto un peligro de sodificación. En la mayoría de las muestras, el agua pertenece a las clases C3-S1 y C4-S2 y en menor proporción a las clases C3-S2 y C4-S3.

En vista de la sobreexplotación existente son muy pocas las recomendaciones viables que pueden darse para el manejo futuro de el acuífero. La única sería suprimir la sobreexplotación, reduciendo las extracciones hasta un volumen equivalente a la recarga, pero como es obvio, esto no es factible desde el punto de vista socio-económico, aunque en un futuro cercano, tal reducción será obligada por los efectos de la sobreexplotación. Sería recomendable también efectuar estudios más a detalle de las condiciones cualitativas del recurso del subsuelo, ya que, tomando en cuenta que las referencias citadas están referidas al año de 1974 y es de suponer que han ocurrido cambios considerables al respecto.

4.- VALLE DEL VIZCAÍNO

La cuenca del Vizcaíno, situada en la parte noroccidental del territorio de Baja California Sur, cubre una superficie de 16000 km² con una superficie acuífera de 70 km² [6]. Las manifestaciones de agua subterránea en el Valle del Vizcaíno se presentan en tres zonas aisladas, con separaciones mínimas de 13 km y máximas de 26 km sin perforaciones intermedias que comprueben la existencia del almacenamiento a través de todo el valle [9].

Por lo que se refiere al almacenamiento, registra una sobreexplotación de alrededor de 3×10^6 m³/año, tomados del almacenamiento de agua subterránea.

Las concentraciones de sólidos totales disueltos para la zona en estudio, varían de 320 a 1792 ppm y tienen promedio de 647 ppm, correspondiendo a concentraciones bajas de sales en el agua.

En el Ejido Benito Juárez, se tiene concentraciones de entre 512 y 1,024 ppm de sólidos totales disueltos, indicando la probabilidad de que esta agua provenga del norte.

En Guerrero Negro, los sólidos totales disueltos varían de 832 a 1,024 ppm.

En general, al agua de toda la región tiene concentraciones de sales bajas, a excepción de la zona al suroeste de Vizcaíno, donde se tienen concentraciones ligeramente altas. Esto se debe a la ocurrencia de rocas sedimentarias marinas con la presencia de probables evaporitas.

El agua subterránea de toda la zona, es apropiada para usarse como potable, ya que en la mayoría de los casos no excede a 1000 ppm de sólidos disueltos (norma vigente en la fecha de el estudio), y cuando los sobrepasa, es en pequeñas porciones .

En cuanto al uso de aguas subterráneas en riego, las muestras del Valle del Vizcaíno corresponden a las clases C2-S1, C3-S1 y C3-S2.

Esta información se tomó de la ref. [9], publicada en 1974, por lo que los datos deben tomarse con cierto recelo, ya que seguramente, a la actualidad ha presentado cambios en cuanto a las concentraciones de sales. Al igual que en los casos anteriores, es deplorable la falta de actualización de estudios geohidrológicos en valles del país que son, por su naturaleza, de vital importancia para el desarrollo agrícola, industrial y ganadero nacional.

5.- COMARCA LAGUNERA

La Comarca Lagunera, ubicada en los estados de Coahuila y Durango, es una de los principales centros agrícolas del país, que hoy día se enfrenta a un grave problema en lo referente al abastecimiento de agua tanto para uso doméstico como para riego.

En lo concerniente a la calidad del agua, se tiene la certeza de la presencia de arsénico en el agua, principalmente en las zonas norte y noreste de la gran llanura de la Región Lagunera, y se ha evidenciado en la salud de los habitantes de las poblaciones rurales, lo que ha motivado la preocupación del gobierno, por lo que se han realizado numerosos estudios a fin de conocer la verdadera magnitud de la problemática que representa la presencia de este elemento tóxico.

Esta calidad varía de acuerdo al punto de ubicación así como con la profundidad, aunque en términos generales es buena para uso agrícola, pero como ya es sabido por todos los estudiosos de este problema y habitantes de esta región, en una gran parte de la zona no es apta para el consumo humano.

Al respecto, existen diversas opiniones relativas al origen del arsénico en las aguas del acuífero de la laguna, que van desde atribuirlo a actividades de tipo antropogénico, hasta de origen natural. Se cree que es más probablemente por el origen histórico de la acumulación de este tóxico, además de la certeza de que la sobreexplotación ha propiciado el aumento en la concentración del mismo [10].

La sobreexplotación media anual en la región es del orden de $750 \times 10^6 \text{ m}^3$ y el abatimiento medio anual del orden de 1.7 m [1].

Los niveles tolerables de ingesta diaria de arsénico aún no han sido determinados, aunque ya se ha detectado la proporción de arsénico que se transmite del agua a algunas especies animales y vegetales.

La contaminación natural del agua para uso y consumo humanos por el arsénico, ha sido objeto de la participación coordinada y concertada del sector salud, la antigua SEDUE, la SARH y las autoridades estatales para solucionar el problema mediante la eliminación del arsénico del agua o el empleo de fuentes alternativas de abastecimiento no contaminadas. Destacan acciones tales como los múltiples y variados estudios que se han realizado; la obtención sistemática a través de la red nacional de monitoreo [10], de información relativa a la calidad del agua, de sus fuentes superficiales y subterráneas, la implantación, mantenimiento y modernización de un laboratorio de calidad del agua; la concertación de diversos convenios con otras instituciones también interesadas en resolver esta problemática. Los estudios realizados para evaluar el riesgo para la salud derivados del consumo de agua contaminada por arsénico, realizados por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados y la Universidad Autónoma de Coahuila en 1974, fueron considerados como elemento básico para actualizar los criterios sobre el arsénico por parte de la EPA de Estados Unidos. Dichas instituciones en colaboración con el Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM, han continuado realizando estudios en las poblaciones expuestas para identificar marcadores bioquímicos y genéticos que puedan servir de apoyo a la identificación de poblaciones en peligro por exposición al arsénico [2].

Es importante mencionar que en la misma zona en la que el agua esta contaminada con arsénico se han encontrado niveles elevados de flúor, lo que hace necesario investigar las consecuencias para la salud humana de esta doble forma de exposición, que también puede darse en otras zonas del país [2].

6.- VALLE DE JUÁREZ

Ubicado en la porción norte del estado de Chihuahua, en la frontera con los Estados Unidos, el valle de Juárez cuenta con una área de explotación aproximada de 272 km² de los 500 km² donde se han llevado a cabo estudios [6]. Es la principal fuente de abastecimiento para Cd. Juárez, de lo que depende su desarrollo industrial y agrícola.

Uno de los grandes problemas que enfrenta, es la sobreexplotación a que ha estado sometido, la cual va asciende a un valor de 14×10^6 m³ de agua por año lo que provoca un abatimiento medio anual de 0.86 m [11].

En cuanto a la calidad, más del 80% del volumen que se extrae del acuífero somero tiene una elevada concentración de sales, que expresada en partes por millón de sólidos totales disueltos es superior a 1500 [11].

Se tienen evidencias de la existencia de un acuífero inferior, a partir de 300 ó 350 m de profundidad, que proporciona caudales brotantes de 15 a 20 l/s, de mejor calidad respecto al agua que se extrae del acuífero somero. Asimismo, en la zona de terrazas, entre el Valle y las sierras de Guadalupe, San Ignacio y La Amargosa, se cuenta con agua de mejor calidad, que fluye hacia el valle bajo, donde se contamina y se extrae con un alto contenido de sales.

El agua subterránea en la porción central del área de Samalayuca es de mejor calidad que la del Valle de Juárez.

En 1970, en vista de los resultados obtenidos por lo que a calidad del agua y dirección del flujo se refiere, en la zona de terrazas entre el Valle y las sierras de Guadalupe, San Ignacio y La Amargosa, se sugirió ampliar las investigaciones con miras a interceptar el agua subterránea antes de su contaminación; no se tiene información actual al respecto.

7.- VALLE DE JIMÉNEZ-CAMARGO

La actual zona de veda de Jiménez-Camargo se localiza en la porción sur del estado de Chihuahua, abarcando parte de los municipios de Camargo y Jiménez así como a los de Villa López, Allende, Zaragoza y San Francisco de Conchos, todos pertenecientes al estado de Chihuahua.

Ante una demanda cada vez mayor de agua proveniente del subsuelo, mediante la operación de pozos y norias en la zona de Jiménez-Camargo, que se inicio a finales de la década de los treinta, y que unos 10 años más tarde aparentemente ya había originado síntomas de sobreexplotación, se decretó en 1951 una veda para nuevos alumbramientos. Los problemas de sobreexplotación indican un déficit de alrededor de 14×10^6 m³/año [12].

El pH de las aguas tiende hacia el valor neutro; el contenido de boro es menor de 7 ppm, por lo que posiblemente el agua ha tenido poco contacto con materiales de origen ígneo; los demás elementos químicos indican que el agua es de buena calidad.

La temperatura de las aguas subterráneas varía entre 21 °C y 28 °C, con una conductividad eléctrica que oscila entre los 500 y 7350 micromhos/cm a 25 °C. Según el criterio de Chase Palmer y los valores del índice geoquímico, las aguas subterráneas de los pozos analizados corresponden a aguas meteóricas de reciente infiltración.

En resumen, la información disponible en cuanto a las características geoquímicas del

agua subterránea es escasa; sin embargo se puede decir, a reserva de tener datos más abundantes, que se trata de agua de buena calidad.

8.- DISTRITO FEDERAL (CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO)

La extensión de casi la totalidad del Distrito Federal se localiza en la cuenca del Valle de México.

El abastecimiento de agua del Distrito Federal se efectúa a través de diversos sistemas, la mayor parte de los cuales tienen sus captaciones dentro del Valle de México. Solamente el sistema de Lerma, capta sus aguas fuera de la cuenca.

Se sabe que desde su fundación, la Ciudad de México aprovechó para el suministro de agua a su población, los vastos recursos hídricos subterráneos disponibles; en sus primeras épocas mediante la captación directa de los afloramientos de manantiales y posteriormente en forma intensa mediante la perforación de pozos. El crecimiento acelerado de la población y su área metropolitana, ha hecho necesaria tanto la intensa explotación de los acuíferos contenidos en la Cuenca del Valle de México como el aprovechamiento de las aguas subterráneas de la Cuenca del Río Lerma y actualmente las aguas del Río Cutzamala.

En la actualidad, prácticamente un 90% del agua que como dotación es entregada a la población del Distrito Federal corresponde a las aguas subterráneas, siendo aproximadamente 3/4 partes de éste volumen, aportado por los acuíferos que existen en el Valle de México [13].

Los sistemas que abastecen al Distrito Federal se muestran en la siguiente Tabla 2.3.

TABLA 2.3 FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DEL DISTRITO FEDERAL

FUENTE	CAUDAL TEÓRICO	CAUDAL REAL (m ³ /s)	CAUDALES SUP.	D.F. (m ³ /s)
SISTEMA LERMA	10.700	7.095	2.700	4.395
SISTEMA PTE.*	0.399	0.275	0.000	0.275
AGUAS SUPERFICIALES*	0.200	0.194	0.000	0.194
SISTEMA NTE. CHICONAUTLA*	1.738	1.573	0.000	1.573
ATZACOALCO. G.A. MADERO.*	0.936	0.721	0.000	0.721
SISTEMA SUR*	7.487	6.623	0.000	6.623
SISTEMA CENTRO*	3.327	3.043	0.000	3.043
SISTEMA OTE.*	1.705	1.543	0.000	1.543
POZOS PARTICULARES*	0.997	0.997	0.000	0.997
MANANTIALES*	0.914	0.914	0.000	0.914
PARCIALES	28.403	22.978	2.700	20.278
SISTEMA NORTE BARRIENTOS +	4.300	2.355	0.000	2.355
SISTEMA NORTE RISCO +	1.000	0.855	0.553	0.302
SISTEMA POZOS SUR. +	5.500	4.565	0.000	4.656
SISTEMA CUTZAMALA +	9.200	7.711	1.136	6.575
PARCIALES	20.000	15.486	1.689	13.797
TOTALES	48.403	38.464	4.389	34.075

*Departamento del Distrito Federal + Gerencia de Aguas del Valle de México.

De aquí que el abastecimiento de agua actual en el Distrito Federal se estime de alrededor de 34.1 m³/s.

Se estima que, en el Distrito Federal, la infiltración de agua anual que alimenta sus acuíferos es del orden de 620 millones de m³. La extracción total anual mediante pozos profundos se estima alrededor de 1085 millones de m³ [6] resultando en una sobreexplotación anual de 465 millones de m³. Este déficit se cubre con las aguas almacenadas en los materiales del subsuelo, motivando el continuo descenso de los niveles piezométricos, y por lo tanto, el hundimiento de la Ciudad.

Además, la intensa explotación a que han sido sometidos los acuíferos del Valle de México, han traído como consecuencia otros efectos irreversibles tales como la extinción de manantiales y lagunas, abatimiento considerable de el nivel freático y degradación de la calidad de las aguas extraídas.

Sin duda alguna, el hundimiento en los depósitos lacustres del área urbana es uno de los efectos más alarmantes, ya que causa asentamientos diferenciales originando con ello problemas en los sistemas de conducción de agua potable y drenaje, así como en la cimentación de grandes edificios que se encuentran en la ciudad [13].

La Ciudad de México está asentada en su mayor parte, sobre el fondo del Antiguo Lago de Texcoco. Las exploraciones efectuadas por diversas instituciones, indican la existencia de una formación arcillosa extraordinariamente compresible, de origen volcánico, cuyas propiedades mecánicas son muy variadas de un punto a otro [14]. Al poniente se encuentran depósitos potentes de grava y arena cubiertos por mantos limoarenosos muy compactos.

La ref. [14] plantea que la capacidad de conducción de los acuíferos es insuficiente para llevar el agua desde las zonas de recarga natural, hasta los centros de explotación en la parte plana con la rapidez requerida de acuerdo a la demanda y, por lo tanto, que el déficit real de agua en el Distrito Federal es mayor que el arrojado por el balance total.

En 1960 se estableció que el agotamiento de las reservas subterráneas de agua y la evolución del hundimiento de la Ciudad de México ocurrirán fatalmente, si no se reducían las extracciones en el Distrito Federal a una cantidad congruente con la recarga natural y con el poder de conducción de los acuíferos.

Hace tres décadas ya se planteaba que para suspender el bombeo de agua en el Distrito Federal, como en los municipios del Estado de México, y además proveer a sus necesidades futuras, debería llevarse agua procedente de otras fuentes, cuyas reservas lo permitieran y en las que la explotación no causara en ellas ni en la región estudiada, los trastornos que se trataban de evitar.

En lo que respecta a la calidad de las aguas subterráneas, existe evidencia de que por lo menos en la zona de Xochimilco [13] se tienen algunas deficiencias al respecto, principalmente por elevadas concentraciones de materia orgánica, contaminación por manganeso, alcalinidad, dureza del agua y detergentes. Las concentraciones en otras sales satisfacen las normas establecidas por la Secretaría de Salud, por lo que se puede considerar que en ésta región no se presentan niveles elevados de sustancias que puedan ser perjudiciales al cuerpo humano.

Las zonas con baja calidad del agua se encuentran en los ramales de San Luis, Tulyehualco y Tecómitl, presentándose deficiencias en los pozos más cercanos a los canales que rodean la zona de chinampas de Xochimilco y Mixquic.

Los mencionados canales conducen agua de una calidad prácticamente residual, puesto que se abastecen con agua tratada proveniente de la Planta de Tratamiento Cerro de la Estrella, así como agua residual de origen doméstico de la población que carece de servicio de drenaje. El lecho de los canales, constituidos por depósitos aluviales es de mediana permeabilidad, que en áreas extensas permite la infiltración de volúmenes considerables de agua con calidad deficiente, que eventualmente alimenta las acuíferos del Valle; los pozos

localizados en la parte alta de la sierra de Chichinautzin, presentan una calidad adecuada para el consumo humano, observándose que el agua se deteriora a medida que se acerca a los canales.

Además, existen otros problemas tales como la presencia de establos, porquerizas y granjas y de tiraderos de basura que realizan los habitantes del lugar de un manera inadecuada y que a la larga repercuten en la degradación del subsuelo, y consecuentemente del acuífero.

Es casi nula la información en otras zonas de la Ciudad de México en cuanto a su calidad, lo cual no deja de ser lamentable considerando la importancia que ésta tiene a nivel nacional.

9.- VALLES DE LEÓN Y RÍO TURBIO

En el estado de Guanajuato se encuentran las zonas de explotación denominada Valles de León y Río Turbio, con una área de estudio aproximada de 2655 km² y una zona de explotación de 2115 km² [6].

En León se tienen problemas de sobreexplotación del orden de 92×10^6 m³ lo que provoca un abatimiento medio anual de 1.4 m [2].

Pero hay que considerar otro problema de gran trascendencia, como lo es la contaminación de los acuíferos que está originando la laguna de oxidación de las aguas negras de la Cd. de León. El agua subterránea es de muy buena calidad, excepto en el sur del valle de León, que es donde ésta se localiza [15].

Sin embargo, el problema hidráulico de mayor envergadura que se presenta en la región está representado por el abastecimiento de agua para la Cd. de León, limitando su desarrollo industrial y crecimiento; la carencia de agua para usos agrícolas también se deja sentir, ya que casi la mitad de la producción agrícola es de temporal.

10.- VALLES DE ATEMAJAC-TE SISTÁN (GUADALAJARA)

El crecimiento de la Ciudad de Guadalajara y zonas urbanas aledañas han originado una demanda cada vez mayor de agua.

El valle de Atemajac se localiza en la porción central del estado de Jalisco, sitio de la ciudad de Guadalajara, y sus prolongaciones de San Pedro Tlaquepaque y Tonalá y el valle de Tesistán, al noroeste de éste. En los dos valles se tienen remanentes de depósitos lacustres y predominan los piroclásticos volcánicos que juntos no exceden unas seis decenas de metros [16].

Existen en el área dos grandes recursos hidráulicos superficiales entre los que destacan el Lago de Chapala y el Río Grande de Santiago.

Se han llevado a cabo estudios como un esfuerzo más para tratar de satisfacer las necesidades del preñado líquido.

El área de mayor concentración de obras hidráulicas es la zona urbana de Guadalajara, donde se encuentran emplazadas unas 414 captaciones además de 3000 norias de uso doméstico.

La zona de Tesistán-Area Metropolitana, situada en la porción noroeste, ocupa una superficie de unos 450 Km². La extracción anual de agua subterránea en el área de Tesistán es de 70 Mm³. De este volumen, 27 Mm³ son conducidos a la ciudad de Guadalajara para uso potable. En la zona metropolitana de Guadalajara se extraen anualmente alrededor de 53 Mm³, 36 para uso municipal (agua potable) y 17 para usos industriales. La extracción total en la región es entonces de 123 Mm³.

De acuerdo con lo anterior, el consumo de agua potable de Guadalajara y áreas aledañas provenientes del subsuelo es del orden de 63 millones de $m^3/año$, es decir $2.0 m^3/s$.

Si a esto se le agrega el volumen que se descarga del subsuelo en forma de manantiales que es de cuando menos $21 Mm^3/año$, se tendrá un total aportado por los acuíferos de $174 Mm^3$ anuales.

La profundidad del nivel varía desde los 5 y 10 m en las vecindades del Río Santiago, a 80 y 100 en las zonas adyacentes a la Sierra de La Primavera en el Valle de Tesistán. En la zona urbana, la profundidad al nivel estático decrece de Oeste a Este, desde los 75 a los 5 m.

De manera general en la mayor parte del área, el agua subterránea circula hacia el cauce del Río Santiago, siguiendo una dirección preferencial de flujo hacia el Este.

Los resultados de los análisis químicos indican que en general, el agua subterránea en la zona es de buena calidad, de acuerdo con los límites máximos permisibles.

En la ciudad de Guadalajara los STD varían entre 100 y 700 ppm [17]. No se cuenta con ningún tipo de estudio biológico de calidad del agua.

Desde un punto de vista químico, el agua subterránea de la región estudiada es del tipo bicarbonatada, sódica o cálcica magnésica, siendo en general de buena calidad, incluso dentro de la clasificación de agua potable, salvo en algunos lugares específicos.

Se puede decir también que dichas aguas son de tipo meteórico con bastante tiempo de haberse infiltrado en el subsuelo.

Sería recomendable efectuar periódicamente los análisis químicos y las configuraciones de los índices para conocer la evolución de los mismos con respecto al tiempo, con una frecuencia anual ya que las referencias citadas datan de 1973 y 1981 (ref [17] y [16] respectivamente) y, con seguridad, los problemas actuales en cuanto a calidad del agua tengan otras características.

11.- VALLE DE MORELIA-QUERÉNDARO

En la zona de explotación denominada valle de Morelia-Queréndaro, ubicado en la parte norte del estado de Michoacán, existen dos fuentes principales de agua subterránea: un acuífero granular y un acuífero basáltico.

En términos generales, el agua subterránea es de buena calidad; contenidos de sólidos totales disueltos menores de 800 ppm predominan en la mayor parte de la zona. La salinidad del agua aumenta hacia la Laguna de Cuitzeo, registrándose en las proximidades de ella contenidos entre 800 y más de 3000 ppm, atribuidos al efecto de la evaporación de aguas freáticas muy someras y a los retornos de riego en la porción baja del distrito [18]. Exceptuando el área inmediata a dicha laguna, en toda la zona el agua subterránea satisface las normas de calidad establecidas desde el punto de vista físico-químico.

12.- VALLE DE CUERNAVACA

El valle de Cuernavaca en el estado de Morelos, afronta actualmente un constante crecimiento demográfico e industrial por lo que la necesidad de agua que se presenta en una región de estas características debe de tomarse muy en cuenta.

Del la ref.[19] se obtuvo que el agua que circula bajo el área de estudio, que abarca alrededor de $60 km^2$, es de magnífica calidad; de origen meteórico; que forma dos sistemas hidrogeológicos: uno que circula a través de basaltos, que da origen a manantiales; y otro acuífero profundo, que corresponde a los clásticos de la Formación Cuernavaca, cuyo flujo dominante es, en general, de sentido norte-sur.

En lo que respecta a la interpretación del "contenido de tritio" en las aguas subterráneas del Valle de Cuernavaca, se obtuvo que las aguas provenientes de las formaciones constituidas por rocas basálticas y calizas, que afloran en forma de manantiales, están compuestas aproximadamente por un 30% \pm 20% de aguas recientes y el resto de aguas viejas, probablemente producto del drenaje de un acuífero de baja permeabilidad; y que las aguas de los pozos son, generalmente, viejas.

13.- VALLES DE SAN JUAN DEL RÍO-TEQUISQUIAPAN-QUERÉTARO

La zona está constituida por tres valles que se denominan de Tequisquiapan, San Juan del Río y Querétaro, respectivamente.

Los dos primeros se encuentran separados por una serranía, orientada de sur a norte y ubicada al norte de la población de San Juan del Río; el Valle de San Juan del Río y Querétaro se encuentran casi separados por el estrechamiento de Villa del Marqués, al este de la ciudad de Querétaro [20].

Se localizan en la región hidrológica más contaminada del país, la cuenca del río Pánuco, lo cual influye indirectamente en la calidad de las aguas subterráneas [5].

Existe una sobreexplotación media anual del orden de $134 \times 10^6 \text{ m}^3$ [21].

Aunque no se dispone de información suficiente respecto a la evolución que ha experimentado el recurso, es razonable suponer que en transcurso de las últimas cuatro o cinco décadas ha sido deteriorada en cierta medida por las actividades humanas pues con la infiltración de los excedentes de riego, la recirculación del agua extraída por los pozos y el ingreso al subsuelo de aguas residuales, se han incorporado a los acuíferos sales en solución y diversos tipos de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Las principales fuentes de contaminación son las aguas residuales generadas en las zonas urbano industriales de Querétaro y San Juan del Río [22].

No obstante lo anterior, solo en el valle de Querétaro es apreciable cierto deterioro de la calidad del agua, manifestado en un incremento de su salinidad y en la presencia de pequeños contenidos de elementos químicos indeseables, aunque el nivel de contaminación no es todavía de gravedad. Por lo demás, en toda la entidad el agua del subsuelo sigue siendo apta para todo uso, excepto en el contenido del ion bicarbonato, que en algunas áreas rebasa con mucho la norma respectiva.

Actualmente la salinidad total del agua subterránea varía en la entidad entre menos de 200 y 750 ppm, con tendencia creciente en la dirección del flujo subterráneo natural; es menor que 350 ppm en las zonas de San Juan del Río y Tequisquiapan de 300 ppm a 650 ppm en la zona de Querétaro.

El sodio, el calcio y el bicarbonato son los iones disueltos predominantes en el agua, siendo los dos primeros aportados por los feldespatos sódico y cálcico constituyentes de las rocas ígneas y de los sedimentos derivados de ellas; el bicarbonato y la baja salinidad del agua, son indicadores de que su infiltración tuvo lugar en épocas recientes y, por tanto, de que su permanencia en el subsuelo ha sido relativamente corta [22].

14.- VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ

Localizado en la parte occidental del estado de San Luis Potosí, el acuífero del valle del mismo nombre presenta una sobreexplotación del orden de $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ anuales [23]. Representa parte de las reservas de agua subterráneas de la provincia geohidrológica de la Meseta Central.

Los núcleos de población más importantes que abastece este acuífero son San Luis

Potosí y Soledad Diez Gutiérrez, ubicados en la cuenca de San Luis Potosí.

En el subsuelo del valle existen dos acuíferos con niveles piezométricos diferentes, en el acuífero superior la profundidad varía entre 10 y 40 m, y para el inferior entre 70 y 110 m. Los materiales que constituyen el acuífero superior son depósitos aluviales, y el acuífero inferior, depósitos aluviales y tobas riolíticas o arenosas. En virtud de que los dos niveles piezométricos se establecen aún en las áreas en que sólo existen depósitos aluviales se considera que la variación de la permeabilidad en el sentido vertical de éstos, que define la presencia de paquetes permeables e impermeables, es lo que origina la presencia de los dos niveles [23]. De acuerdo a las 30 muestras analizadas en el estudio de referencia [24], 15 de las cuales corresponden al acuífero somero y 15 al inferior, determinaron que el agua de los dos acuíferos es de buena calidad, apta para uso potable, industrial, ganadero y agrícola. El agua contenida en los dos acuíferos es de origen meteórico, siendo la del acuífero inferior de mayor tiempo de infiltración. El contenido de todos los elementos analizados es bajo, con excepción de los nitratos y del boro que exceden las normas de calidad establecidas. Para la zona, de acuerdo con los contenidos de sólidos totales disueltos determinados puede decirse que en general la calidad del agua es buena, presentando valores que van de 200 a 700 ppm, en el acuífero superior y de 200 a 400 ppm, en el acuífero inferior [23].

Las aguas del acuífero superior son del tipo sódico-bicarbonatadas al sur del área, y cálcico bicarbonatadas al oriente de San Luis Potosí. Las aguas del acuífero intermedio son del tipo sódico-potásico-bicarbonatadas en la Cd. de San Luis Potosí y zonas aledañas y el resto es una mezcla de cationes con una alto contenido de bicarbonatos [24].

Se menciona también que los contenidos de nitratos más nitratos detectados en aprovechamiento ubicados en el área de riego con aguas negras ubicada al sur y sureste de Soledad Diez Gutiérrez, rebasan los límites permisibles para ser utilizados en el abastecimiento de agua potable, y por otra parte, algunos contenidos altos de boro detectados en la misma área, restringen el uso del agua para riego de los cultivos tolerantes a dicho elemento.

15.- VALLE DE CABORCA, SONORA

El valle se localiza en la parte nororiental del estado de Sonora, en la región hidrológica de Sonora Norte (VIII) y forma parte de los recursos hídricos del subsuelo de la provincia geohidrológica de las Planicies Costeras del Pacífico (II). Se han realizado estudios en una área aproximada de 16000 km², de los cuales, 630 km² están en explotación [6].

Además, presenta problemas de sobreexplotación del orden de $290 \times 10^6 \text{ m}^3$.

En 1976 el agua subterránea de las zonas estudiadas era de muy buena calidad con excepción de la Zona Trincheras-El Claro, donde el flujo subterráneo proviene de los Valles de Magdalena y Santa Ana; traía consigo un incremento en la salinidad, debido probablemente al riego intenso que se lleva a cabo en estos últimos valles [25].

El agua de mejor calidad se encontró en la Subcuenca del Río de los Alisos, donde las concentraciones promedio de sólidos disueltos totales (STD), para el agua subterránea, fueron de 214 ppm.

En los Valles del Ocuca, Coyotillo y Benjamín Hill, las concentraciones promedio de sólidos totales disueltos eran menores de 450 ppm.

En el Valle de Llano Blanco, no había existido ningún cambio en la composición química del agua, según el autor desde 1973 a 1976 que se llevó a cabo el estudio referido; siendo el promedio de concentraciones de sólidos totales disueltos de 500 ppm.

16.- VALLE DEL RÍO SONORA

Ubicado en la cuenca del río Sonora, en la parte noroccidental del estado del mismo nombre, el acuífero del valle del Río Sonora representa parte de las reservas acuíferas de la provincia geohidrológica II; la región apoya su economía en actividades tales como la agricultura y la ganadería, mismas que se llevan a cabo con el aprovechamiento de aguas subterráneas y superficiales que escurren por el río Sonora.

La calidad de las aguas subterráneas se consulto en ref. [26], la cual señala que para este fin, se realizó un muestreo de dichas aguas, en un buen número de pozos con objeto de medir su conductividad eléctrica y su temperatura.

En la zona de Ures se reporta una anomalía en los valores de la conductividad, la cual se atribuye a que en esta zona se produce una infiltración de aguas relativamente limpias de sales, provenientes de los arroyos Zolibiata, La Salada y La Junta.

Por los valores que presentan las curvas de conductividad, que oscilan entre 500 y 1000 micromhos/cm, concluyen que las aguas son de buena calidad para fines agrícolas.

De las mediciones de temperatura del agua alumbrada que se efectuaron en los pozos, en la mayoría de ellos se tienen temperaturas de 23°C, salvo en la zona aledaña a la presa Abelardo Rodríguez L., en la cual la temperatura es ligeramente mayor, siendo de 25°C.

Como característica notable en cuanto a temperatura de las aguas subterráneas, debe mencionarse la que presentan dos de los cuatro manantiales localizados en la zona, cuyas aguas tiene temperatura de 60°C; estos dos manantiales se ubican en las cercanías del poblado de Aconchi, al suroeste del mismo.

Es necesario tomar con cierto recelo estos datos, debido a que, como en la mayoría de los casos, la información disponible esta referida a estudios realizados en los años 1971-1976.

17.- COSTA DE HERMOSILLO

El Distrito de riego No. 51, conocido con el nombre de Costa de Hermosillo, está ubicado en la llanura costera del municipio de Hermosillo, en el estado de Sonora, al oeste de la Cd. de Hermosillo. Pertenece a la provincia geohidrológica II y a la región hidrológica de IX (Sonora Sur).

La importancia de la zona reside básicamente en su agricultura, sus cultivos predominantes son el trigo y el algodón [27]. El área de estudio asciende a una superficie total de 1500 km², contando con una superficie acuífera de 960 km² [6].

Los acuíferos del Distrito de Riego No. 51, están alimentados por agua meteórica de reciente infiltración [28].

De los efectos principales inducidos por el excesivo bombeo, el más nocivo lo constituye sin duda alguna la intrusión salina de mar.

Esta intrusión se advierte en las zonas costeras del Distrito. En 1970, según ref [27], la zona invadida por la intrusión salina, afectaba a unos cuantos pozos; sin embargo el problema hoy en día debe ser más serio debido a la gran velocidad de avance de la interfase salina y al hecho de que ésta se encontraba entonces en los linderos de los campos de pozos. También se pronosticó, que de continuar el bombeo con la misma intensidad, deberían abandonarse por contaminación en lo futuro, alrededor de 75 pozos cada cuatro años; esto daría al sistema, suponiendo una relocalización continua de los pozos a la velocidad indicada, un período de vida cercano a los 25 años. en dicho plazo se debería encontrar la solución del problema, bien fuera llevando agua de otras fuentes, o finalmente reducir al término del plazo indicado, la extracción a unos 350 x 10⁹ m³/año. También se menciona que la situación podría

agravarse antes de completarse ese periodo, lo cual nos lleva a pensar que de ser así, actualmente las condiciones del acuífero son de extrema gravedad.

El estudio de actualización de la interpretación geoquímica de los índices analizados, correspondientes al acuífero superior de la Costa de Hermosillo en 1970 [28], no aporta nada nuevo a las conclusiones del estudio preliminar, excepto en lo referente al ligero avance manifestado por la intrusión salina de mar.

Este fenómeno ya había originado la necesidad de abandonar algunos pozos por la contaminación de sus aguas, además de notarse un gradual incremento en algunos de los valores de los índices geoquímicos de las aguas analizadas de otros pozos.

La escasa información geoquímica de la zona del Sahuaral, demuestra que la calidad de las aguas subterráneas en esta zona, ya en 1970, dejaba mucho que desear. Sin embargo, no se pudo determinar si este fenómeno se debía a los efectos de una intrusión salina de mar, o a condiciones geológicas locales [28].

18.- VALLE DE GUAYMAS

La región agrícola del valle de Guaymas forma parte de la cuenca hidrológica del río Mátape, se haya enclavada parcialmente en los municipios de Guaymas y Empalme, en la región central del estado de Sonora. El Distrito de riego No. 84 controla esta zona, la cual está vedada para la perforación de pozos. Es una de las explotaciones subterráneas más importantes de la provincia geohidrológica de Las Planicies Costeras [29].

Además tiene problemas de sobreexplotación de $800 \times 10^6 \text{ m}^3$ por año y abatimiento medio anual de 1.6 m [1].

La interpretación de los índices geoquímicos de las aguas alumbradas del acuífero superior del Valle de Guaymas y los pocos datos disponibles de su evolución, señalaban, ya en 1969, una intrusión salina del mar, que avanzaba paulatinamente tierra adentro [29].

Sería muy aventurado tratar de determinar la velocidad de avance de dicha intrusión, pues los datos de la evolución de los índices geoquímicos son muy escasos. Esto se debió a que no se muestreaban los mismos pozos para las mismas fechas, así como a un deficiente control de las reposiciones de los pozos afectados por la contaminación de sus aguas, pero es obvio, que si hace aproximadamente 30 años ya se podía detectar el problema, la situación se haya agravado con el tiempo.

Los valores de la conductividad eléctrica de las aguas alumbradas, también señalaban la evidencia de una intrusión marina.

Cabe la posibilidad que la gradual salinización de los acuíferos en la zona costera, fuese un efecto combinado de la intrusión salina del mar y el nulo drenaje agrícola de las aguas freáticas de la región, aunque este último efecto, en bastante menor proporción que el apuntado en primer término.

19.- VALLE DEL YAQUI

En el Estado de Sonora, la principal actividad económica de carácter primario, enfocada a satisfacer las necesidades de alimentación básica, es sin duda la agropecuaria. Así tenemos que, específicamente la región sur del Estado (en donde se encuentra el municipio de Cajame y el Valle del Yaqui), ha experimentado un creciente desarrollo, sustentado inicialmente en la agricultura, la que en la actualidad puede considerarse como una de las más tecnificadas del país, secundado por una actividad pecuaria de características similares a las de la agricultura en cuanto a tecnificación e importancia económica, y finalmente consolidado por una cada vez

más pujante agroindustrialización.

Lo anterior ha propiciado entre otras cosas que el municipio de Cajame tenga un crecimiento bastante acelerado, con índices poblacionales arriba del nacional en los últimos años. Esto a su vez ha traído consigo graves problemas ambientales, básicamente en lo que se refiere a tres de sus principales recursos naturales: agua, suelo y aire; los que han venido sufriendo un persistente deterioro, y de no tomarse medidas adecuadas para evitarlo, se corre el riesgo de caer en problemas ambientales irreparables como, agotamiento del manto freático, contaminación de acuíferos, contaminación de cuerpos receptores de agua, en este caso fuentes subterráneas [30].

La zona se encuentra localizada en la porción meridional del estado, entre los deltas del los ríos Yaqui y Mayo, en la cuenca del primero. Esta área tiene un clima cálido y seco, con precipitaciones de alrededor de 300 mm/año y una evaporación potencial total de más de 2000 mm/año. Casi 250000 ha han sido cultivadas por el sistema de irrigación desde el año de 1940, principalmente con agua de la presa del río Yaqui. Una gruesa capa de sedimentos aluviales forman un acuífero muy útil que es explotado por medio de aproximadamente 300 pozos que actualmente producen más de 500 Mm³/año. Esta área es la más productiva en cuanto al cultivo de cereal en México, pero existe una creciente preocupación acerca del incremento de salinidad en el agua subterránea. Esto ocurre en áreas en donde el nivel freático es mayor de 10 m, y es más marcada en pozos con captaciones poco profundas. No está, por lo tanto, asociada con intrusión salina costera. El fenómeno está muy difundido y en las áreas más afectadas las concentraciones ahora exceden de 500 mg/l de cloro, y en sulfatos 300 mg/l, y la salinidad está incrementándose a 50-100 ppm de STD por año. La salinización a poca profundidad debajo del nivel freático de aguas subterráneas es presumiblemente peor que aquella registrada en pozos profundos de producción [31].

Además, en el área también existen problemas de salinidad de las aguas de los pozos, originadas por la mala construcción de estos; con los datos disponibles no se pudo averiguar a que profundidad se encuentran las aguas saladas [32].

Según la referencia [6] cuenta con una área de estudio estimada de 3450 km² y una zona acuífera de 2054 km²

Se evidencia la existencia de dos tipos de aguas bien definidas, uno carbonatado y otro clorurado o carbonatado sódico. Se observó también que existen tres zonas de valores anómalos, localizadas en la cercanía del Canal Bajo, al sureste de Cd. Obregón, en los alrededores del canal alto y del arroyo Cocoraque, y a lo largo de una franja paralela al río Mayo. En 1970, éstas tres áreas de valores anómalos, fueron interpretadas como fuentes de alimentación de aguas superficiales, haciéndose notar que en la zona del Canal Bajo posiblemente se verifiquen contaminaciones debidas a la presencia de lentes de evaporitas en los materiales que constituyen los rellenos del valle [32].

20.- PLANICIE YUCATECA

La Península de Yucatán es una de las más importantes provincias geohidrológicas y que cuenta con más información respecto a las características cualitativas del agua subterránea, con graves problemas de contaminación de estas por desechos urbanos, principalmente en los centros poblacionales. Además de éste, existen problemas de salinidad, como se verá más adelante.

En toda la península, a lo largo de las líneas de costa, el agua de los acuíferos se encuentra descansando sobre el agua de mar, debido a la diferencia de densidades de estas. El contacto entre las dos masas de agua, conocido como "interfase salina" se encuentra en

equilibrio dinámico, por lo cual, las modificaciones en las condiciones originales del acuífero, producen cambios en la posición del contacto entre las dos masas de agua. Así, la variación del nivel estático, provocada ya sea por explotación de agua subterránea o por la recarga de lluvia del acuífero y las variaciones del nivel del mar por mareas, producen modificaciones en la porción de la interfase salina [33].

El nivel estático se eleva a solo 4 msnm, por lo cual la carga hidráulica del acuífero hacia el mar es reducida y el agua salada no es desplazada, encontrándose a pocos metros de profundidad.

El agua subterránea se estratifica de acuerdo a su densidad, la cual esta en función de su salinidad. Así, el agua con mayor cantidad de sales tiende a ocupar las partes bajas mientras que la menos salada, flota sobre la primera.

El agua del acuífero de esta región lleva en solución una cantidad determinada de sales, la cual varía dependiendo de muchos y muy complejos factores. La ref [33] concuerda con [34] en que los dos factores más importantes y significativos en la composición química del agua y los que más contribuyen a los altos contenidos de sales son la acción química de los minerales carbonatados o disolución de rocas calcáreas y, mezclado entre cuerpos de agua dulce y agua salada de mar, aunque también son un índice de las características químicas del agua subterránea, las diferencias químicas del agua de lluvia y la contaminación local por desechos urbanos.

También concuerdan en que el flujo localmente es errático, pero la referencia [35] afirma que el flujo preferencial del agua subterránea va de suroeste a noreste aunque con cambios locales de dirección y como el agua subterránea no es aprovechada en su potencialidad, el flujo preferencial hacia la costa se ha mantenido dejando a salvo de contaminación las zonas de captación de agua potable.

Los resultados obtenidos deben de tomarse con reservas, debido a que no se cuenta con suficiente información y la mejor comprobación de las direcciones de flujo sería una historia piezométrica de elevaciones del nivel estático y su evolución con respecto al tiempo. Otro factor que también afecta los resultados expuestos es la distribución de los muestreos, los cuales son prácticamente sobre las carreteras, encontrándose grandes áreas sin información [34].

La lente de agua dulce bajo la Península, debe tener espesores que varían de 0 a 160 m, con las mayores profundidades en el centro, aunque el agua de mejor calidad se encuentra en los primeros 15 m de profundidad, habiéndose registrado agua de buena calidad hasta 100 m de profundidad en algunos aprovechamientos que así lo permitieron; el lente de agua dulce tiende a adelgazarse hacia las costas donde el agua dulce se encuentra contaminada por agua de mar, cuya concentración de sales aumenta a profundidad y en dirección al mar, hasta tener más de 30,000 ppm [33].

Sin embargo en lo que respecta a cantidad de coliformes, en localidades como Mérida se han presentado valores mayores a los de las normas, y en general, en ciudades y poblados, donde las aguas negras municipales son infiltradas al acuífero por medio de fosas sépticas y cenotes.

El grado de contaminación aumenta, mientras la población es más grande, así el mayor problema se registra en la ciudad de Mérida en donde el Dr. José Herrera Díaz, en su trabajo titulado "Enfermedades Hídricas" al analizar las estadísticas de mortandad infantil, observó que el 41 % de las defunciones en niños menores de 6 años, fueron ocasionadas por enfermedades hídricas. Según el autor, este porcentaje ha disminuido debido a que la ciudad cuenta con sistemas de agua potable; mas no de alcantarillado por lo que aún así, el acuífero tiene un alto grado de contaminación [33].

La ciudad de Mérida, Yucatán, cuenta con 612,232 habitantes en una extensión urbana de 8,306.39 Ha, representando el 52% del área municipal con una densidad promedio de 70 hab/Ha. A la fecha se tienen 105,544 tomas de agua potable con lo que se da servicio a más del 90% de la población; únicamente un 10 % de la población cuenta con servicio de alcantarillado sanitario, y todas las descargas son al subsuelo por medio de pozos de absorción [35].

En el área municipal, se encuentran establecimientos de tipo industrial, de estas, 77 se ubican en la Ciudad Industrial de Felipe Carrillo Puerto; 4 en el Parque de Industrias no Contaminantes; y el resto se encuentran en el área urbana y abarcan a 200 pequeñas y medianas industrias y más de 1000 talleres y establecimientos pequeños. También hay más de 43 hoteles y 26 clínicos y hospitales estimándose una DBO_5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno) generada del orden de 24,641,000 kg/año: 70% urbano y 30% industrial.

Uno de los principales problemas que afronta la Península, es la localización de áreas y dispositivos de desecho para depositar las aguas negras municipales e industriales que actualmente son infiltradas al acuífero de agua dulce por medio de pozos superficiales que se localizan en cada casa o industria.

Los lodos se disponen en cuatro charcas situadas en la periferia de la ciudad permitiendo la infiltración de volúmenes importantes altamente contaminados. Además, estas charcas se encuentran en la zona de alta preservación ecológica.

En la mayoría de las poblaciones no se cuenta con drenaje apropiado, además de que en cada casa tienen una fosa séptica que no reciben ningún mantenimiento adecuado y periódico que garantice que los sólidos se sedimenten y a través de la cual las aguas residuales alcanzan el nivel freático ocasionando contaminación directa de las aguas del subsuelo [36].

Las aguas residuales generadas en todos los sectores y actividades de la ciudad de Mérida, equivalentes a 1500 l/s, son descargadas al acuífero, incluyendo los efluentes de fraccionamientos que cuentan con alcantarillado sanitario ya que la descarga final es por medio de pozos de absorción, e importantes volúmenes de agua residual proveniente de clínicas y hospitales e industria, que en la mayoría de los casos no llevan previo tratamiento o acaso un paso por tanque sépticos. Esta descarga no es uniforme ya que la densidad de población varía por lo que en tan solo un 21% del área urbana descarga el 47% de la carga orgánica total generada [35].

Esta contaminación de por sí ya peligrosa, se agrava durante el período de lluvias por la rápida infiltración que ocurre arrastrando sedimentos y contaminantes disueltos a través del suelo permeable y de las estructuras producidas por la disolución en todas direcciones; la basura, incluyéndose los desechos clínicos y hospitales [36], que es expuesta a cielo abierto y sin medidas de protección, es un foco de insalubridad y afecta la calidad del agua por infiltración de lixiviados, que en época de lluvias se incrementan notablemente, estimándose que irá en aumento a medida que se incrementa el desarrollo rural y urbano con el crecimiento demográfico, debiéndose tomar medidas inmediatas en las zonas urbanas realizando estudios de alcantarillado para que se adapten a las características topográficas y geológicas de la ciudad [35].

Además de todo esto, la población con escasos recursos económicos y asentada en predios irregulares, viven en construcciones antiguas o que no cuentan con servicios básicos y en muchos casos continúan realizando fecalismo al aire libre. Además, en la mayor parte de los casos cuentan con animales de traspatio o tienen pequeñas granjas agropecuarias en los terrenos que habitan. Las escretas, en ambos casos, por lo general son dispuestas a cielo abierto por lo que al llegar la precipitación, se infiltran gran cantidad de patógenos y materia

orgánica, contaminando los pozos que les sirven de abastecimiento.

TABLA 2.4 ÍNDICES QUE MUESTRAN LA PRESENCIA DE MATERIA ORGÁNICA EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CIUDAD DE MÉRIDA

ÍNDICE	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	RANGO PROMEDIO EN QUE SE ENCUENTRA
Coliformes	200 *	1500-8100 *
Fosfatos	0.01 mg/l	1.14 a 5.5 mg/l
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	4 mg/l	20 a 35 mg/l
Nitrógeno orgánico	0.1 mg/l	0.7 a 1.5 mg/l

*colonias bacterianas por centímetro cúbico de muestra. Ref. [33].

Actualmente el porcentaje de mortandad infantil ha disminuido, debido a que la ciudad cuenta con sistemas de agua potable, mas no de alcantarillado por lo cual el acuífero tiene un alto grado de contaminación [33].

Ya en 1976 se detectaba la contaminación por presencia de materia orgánica y su rango de variación de valores promedio de algunos parámetros; con el objeto de mostrar el grado de contaminación del agua subterránea en la ciudad de Mérida, en la Tabla 2.4 se muestran los principales índices que ya entonces se presentaban.

En la ref [35] se establece que la capacidad del cuerpo receptor para asimilar las sustancias contaminantes ha sido sobrepasada, haciéndose patente en muestras de agua que presentan DBO₅ de 30 mg/l y coliformes fecales y totales por arriba de la norma. Aunque mencionan también que la contaminación se reduce a los primeros metros superficiales del acuífero, ya que el agua después de los 20 m, es por lo general de buena calidad.

Adicionalmente, se tiene información de contaminación de agua subterráneas debido al depósito de desechos porcícolas en varias zonas y granjas porcícolas, detectándose concentraciones promedio de nitratos en el agua subterránea de 83.24 ± 25.52 mg/l, valor considerablemente mayor a los límites permitidos por las normas nacionales e internacionales de calidad de agua [37].

Otro estudio de las aguas subterráneas de una población rural (10,000 hab), que se encuentra a 10 km de la ciudad de Mérida y tiene funcionando actualmente 60 granjas porcícolas con una población media de 40,000 cerdos, con servicio de agua potable deficiente, y que consume el agua subterránea a través de los pozos someros que se encuentran en sus casas y en las granjas, afirma que esta agua no cumple con las normas establecidas para el consumo humano, ya que tiene un promedio de 9,000 col/100 ml de coliformes totales, 6,800 col/100ml de coliformes fecales y se aisló E. Coli en el 100% de las muestras analizadas, identificándose los géneros de Enterobacterias presentes en todas las muestras [38].

También se encontró que las prácticas agrícolas con el uso inadecuado de sustancias químicas sintéticas han contaminado el agua subterránea debido a las características geohidrológicas del acuífero regional, detectándose la presencia del herbicida 2,4-D en las aguas subterráneas provenientes de algunos municipios. Se supone que la presencia del herbicida está asociada con el fenómeno de recarga del acuífero que se da después de la

época de lluvia, aunque cabe la posibilidad de que el herbicida 2,4-D, haya alcanzado el nivel de las aguas subterráneas en época de recarga; sin embargo, según el autor, haría falta el empleo de otras técnicas cromatográficas para corroborar estos resultados [39].

En varias ocasiones, se ha pensado en la posibilidad de conducir las aguas negras de Mérida al mar, mediante tuberías que tendrían que depositar los residuos a varios kilómetros de la costa, donde el mar tuviera una profundidad suficiente. Pero esto, constituye una inversión costosa.

La solución más factible que se presenta a este problema, es el tratamiento de las aguas negras y la inyección de los residuos en pozos de absorción llevadas a profundidades tales, que la salinidad del agua, supere las 2000 ppm, donde los desechos adquieren mayor densidad y pierde su tendencia a subir [33]. El inconveniente de este método es que la construcción y mantenimiento de las plantas de tratamiento resultaría honerosa ya que habría que impermeabilizar grandes superficies de terreno [34].

La perforación de pozos de absorción, es más recomendable mientras más cercana a las costas se encuentre, y las zonas de captación se deben localizar en dirección opuesta. Se debe procurar, que los pozos de absorción no contaminen al acuífero, perforándose a profundidades donde se confirme la permeabilidad de las caliza y que esta contenga agua salobre, donde la densidad provoca que los desechos no emigren a partes superiores [33]. Aunque otro artículo más reciente menciona, acerca de la perforación de pozos profundos de absorción por debajo de los 100 m, que se aseguró podrían absorber hasta 300 l/s cada uno, que se han tenido experiencias en las cuales se ha demostrado que estos pozos solo son capaces de absorber un máximo de 2 l/s y que en la mayoría de los casos tiene una vida útil muy reducida [35].

También se recomienda la instalación de sistemas de alcantarillado en las principales poblaciones urbanas de la península [34], y la instalación de un sistema de drenaje sanitario, el cual inclusive se construyó en parte y quedo inconcluso [35].

ANÁLISIS

La sobreexplotación representa un gran problema para el país en cuanto al agua subterránea; además de los acuíferos principales antes descritos con este tipo de problema, existen en el país otras regiones con graves problemas de este tipo, los cuales se enlistan en la Tabla 2.5.

De acuerdo a las características analizadas de las diferentes zonas de explotación en las provincias geohidrológicas del país, se puede decir que los problemas más graves que le aquejan son, por una parte, la poca captación del recurso agua en el subsuelo, ya sea por mínimas precipitaciones o por la falta de infiltraciones importantes debido a la baja permeabilidad de las rocas en algunas regiones; y por otro lado la explotación no planificada o más bien desmedida que ha obedecido a un crecimiento tanto poblacional, agrícola e industrial provocando que la demanda sea mayor que la disponibilidad, conllevando con esto a la sobreexplotación de muchos de sus abastecimientos subterráneos y así provocando, en las zonas costeras la inmigración aguas adentro, de agua de mar, inutilizando parcial o totalmente las fuentes y en otras regiones por la explotación de agua de estratos muy profundos con muchas sales en disolución o con mucho tiempo de contacto con estas.

Sin embargo, no solo la sobreexplotación preocupa en cuanto a agua subterránea se refiere, existen regiones con graves problemas de contaminación como lo es la Comarca Lagunera, Yucatán, el Distrito Federal, la contaminación por retornos urbanos, agrícolas o industriales o algún tipo de infiltración de aguas negras, como es el caso del Valle de

Aguascalientes y el Valle de León, y algunas zonas locales como los recientes problemas de fugas de gasolina en alcantarillas en diferentes partes del país, aunque la más común es la contaminación en formaciones que por su carácter geológico, aunque poseen buenas características de permeabilidad y porosidad, presentan en ocasiones lentes de estratos salinos que contaminan el recurso subterráneo y podría afirmarse que un fuerte porcentaje de problemas de este tipo aquejan a los mantos acuíferos nacionales, aunado al problema inminente de la sobreexplotación del recurso, que ya por sí solo es bastante grave.

Sería recomendable además, llevar a cabo más estudios geohidrológicos, así como actualizar los ya existentes, para tener un panorama global de las condiciones de calidad y cantidad del recurso subterráneo, y darle al agua subterránea la importancia que realmente merece, como una de las principales fuentes de abastecimiento tanto doméstico como ganadero e industrial.

TABLA 2.5 ZONAS CON EXPLOTACIÓN EXCESIVA DE AGUA SUBTERRÁNEA

Zona	SMA	AMA	Comentario
Pescadero, BCS.	0.2	0.16	Intrusión salina
Todos Santos, BCS.	0.5	0.55	Intrusión salina
La Paz, BCS.	8.0	0.40	Intrusión salina
Santo Domingo, BCS.	190.0	0.90	Intrusión salina
Ojos Negros, BC.	2.1	0.53	Sales de riego
Real del Castillo, BC.	0.5	0.18	
Mexicali, BC.	900.0	0.50	Intrusión salina
San Luis Río Colorado, BC.	50.0	0.50	
Río Magdalena, BC.	104.0	1.00	Intrusión salina
Río Magdalena, BC.	96.0	1.00	
Río Magdalena, BC.	48.0	0.90	
El Sahuaral, Son.	70.0	2.00	
Hermosillo, Son.	500.0	2.00	Intrusión salina
San José de Guaymas, Son.	8.0	1.10	Intrusión salina
M.I. Río Simala, Sim.	50.0	1.50	
Villa Ahumada, Chih.	123.0	-	
Janos, Chih.	33.0	1.00	
Casas Grandes, Chih.	2.0	2.00	
Aldama, Chih.	9.0	-	Zona de veda
Río Florida, Chih.	14.0	0.60	
Calera, Zac.	80.0	-	
Loreto, Zac.	17.0	0.40	
Laguna Seca, Gto.	14.0	0.90	
Bajío-Celaya, Gto.	80.0	1.64	Zona de veda
Toluca, Méx.	170.0	1.50	
Mina, N.L.	2.0	0.70	

SMA = Sobreexplotación media anual (millones de m³)
 AMA = Abatimiento medio anual (m)
 ref. [1]

CAPÍTULO 3

CONCEPTOS DE CONTAMINACIÓN Y CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA

3.1 CONCEPTOS DE CONTAMINACIÓN

Antes de entrar en detalle en un tema como el de la contaminación del agua subterránea es necesario establecer una serie de definiciones indispensables.

La contaminación del agua se puede definir como la alteración de su calidad natural por la acción humana, que la hace total o parcialmente inadecuada para la aplicación útil a que se destina.

En tal definición existen dos conceptos implícitos importantes: el de la calidad natural y el de la aplicación útil.

La calidad natural del agua es el conjunto de características físicas, químicas y bacteriológicas que presenta el agua tal y como la encontramos en su estado natural en los ríos o manantiales, en el mar y el subsuelo. Entre estas características cuentan, por ejemplo, la temperatura, la cantidad y el tipo de sales en disolución, los gases disueltos, el contenido en microorganismos, etc.

La aplicación útil es aquel uso del agua que proporciona un beneficio al hombre, sea económico, social o simplemente psicológico, y es evidente que cada aplicación útil tiene unas exigencias en calidad particulares y diferentes. Entre las muchas aplicaciones del agua de un río figuran, por ejemplo, la producción de energía hidroeléctrica, el mantenimiento de una fauna acuática, el embellecimiento del paisaje y, obviamente, el abastecimiento agrícola, industrial y urbano. El agua que decimos contaminada lo está a veces para unas aplicaciones y no lo está para otras que se conforman con una calidad inferior [40].

Las únicas aplicaciones útiles del agua subterránea son prácticamente las de abastecimiento urbano, industrial y agrícola, con la particularidad de que el agua subterránea -sea procedente de manantiales o de pozos y sondeos- se considera como la más adecuada para el consumo humano.

La importancia de estudiar la contaminación de agua del subsuelo radica en que más del 16% del agua que utilizamos los mexicanos proviene de fuentes subterráneas, y un porcentaje considerable (68.2%) del agua de consumo urbano procede directamente de fuentes subterráneas [1].

No obstante el balance positivo del agua subterránea en el ámbito nacional, regionalmente el déficit es considerable y se cubre sobrexplotando los acuíferos, como se vio en el capítulo anterior.

3.2 NORMATIVIDAD

Como ya se mencionó, en lo que toca a las aguas subterráneas, tienen como casi únicas aplicaciones útiles el abastecimiento urbano, agrícola e industrial.

Las aguas utilizadas por el hombre, ya sean de superficie o subterráneas, presentan una serie de características físicas (olor, color, turbidez), químicas (elementos o sustancias disueltas) y bacteriológicas (contenido en microorganismos), que determinan lo que, en términos un poco ambiguos, se llama calidad del agua.

Cada una de las aplicaciones útiles del agua requiere un distinto grado de calidad, existiendo unos ciertos límites relativos a las características antes mencionadas, más allá de los cuales los beneficios de cualquier tipo producidos por el uso del agua se ven seriamente disminuidos, anulados o transformados en perjuicios.

El objetivo es presentar en forma sintética estos límites, normas o estándares de calidad del agua para sus tres usos principales (que son prácticamente los únicos que tiene el agua subterránea), comentando las diversas normas, tanto legales como de uso corriente y basadas en la moderna tecnología, que se utiliza hoy en el mundo, y especialmente en México.

Tales normas de calidad se mencionaran por separado para cada una de las aplicaciones útiles mencionadas. A este respecto, es muy importante mencionar que la "calidad" del agua puede sufrir cambios importantes desde la fuente de abastecimiento (la boca del sondeo, por ejemplo), hasta el punto de utilización (el grifo de casa, o el final de la acequia o tubería de riego) [40]. Aguas para bebida que no son aceptables en origen pueden tratarse de forma conveniente (cloración, ablandamiento, etc.) y hacerlas perfectamente potables, o bien, al contrario, aguas perfectamente válidas en origen pueden degradarse o contaminarse entre la fuente y el punto final de utilización (vertido de residuos nocivos para las plantas en acequias de riego, contaminación por aguas fecales en redes de distribución con fugas, etc.).

Las normas que aquí se contemplan, se refieren siempre a la calidad del agua en el momento de su inmediata utilización y, en algunos casos, incluyen no solo los límites que no deben sobrepasarse, sino aquellos que se consideran más convenientes, o que producen un mayor beneficio dentro de un campo de posibilidades todas ellas aceptables. En el caso especial de las aguas para riego, dado el gran número de factores que intervienen en la determinación de la "calidad adecuada", los límites son muy poco precisos.

3.2.1 AGUAS PARA ABASTECIMIENTO DOMÉSTICO

La norma nos marca el límite de un objetivo a alcanzar para que el agua tenga características que la consideren como de excelente calidad. La concentración máxima permisible, será el límite a partir del cual la calidad disminuye y puede provocar un rechazo por parte del consumidor. Cantidades mayores de sustancias a tolerar pueden poner en peligro la salud, por lo que es importante establecer a partir de que punto al agua se le debe considerar impropia para uso potable y proponer un rango aceptable en términos cuantitativos.

Según la normatividad mexicana, se considera que las aguas disponibles para bebidas deben cumplir con las características presentadas en la Tabla 3.1.

En lo particular se debe de hacer hincapié en la revisión de la turbiedad, disminuyendo su valor máximo permisible. La norma actual marca 10 unidades como sílice (SiO_2); sin embargo, por seguridad y control bacteriológico se recomienda un valor de 1.0 UTN (unidades de turbiedad nefelométricas). Habría que incluir de nuevo la dureza total por ser un

TABLA 3.1 PARÁMETROS COMPARATIVOS DE LA CALIDAD DEL AGUA EMITIDOS POR LA SRÍA. DE SALUBRIDAD Y ASISTENCIA EN 1953 Y LA SRÍA. DE SALUD EN 1988

PARÁMETROS	S.S.A (1953)	S.S. (1988)
<u>Caracteres físicos</u>		
Turbiedad Esc. Sílice	10	10
Color Esc. Pt-Co.	20	20
Sabor	Agradable	Característico
Aspecto	..	Líquido
pH	6-8	6.9-8.5
Olor
<u>Caracteres Químicos (mg/l)</u>		
Alcalinidad Tot. Como CaCO ₃	400	400
Aluminio	..	0.20
Arsénico	0.05	0.05
Bario	..	1
Cadmio	..	0.005
Calcio
Cianuro como ion CN-	..	0.05
Cobre	3	1.5
Cloro libre:		
en agua clorada no menos de	0.001	0.20
en agua sobreclorada no menos de	0.20	..
ni más de	1	1
Cromo Hexavalente	0.05	0.05
Dureza total como CaCO	300	..
Dureza de Calcio como CaCO ₃	..	300
Dureza permanente o de No-Carbonatos, como CaCO ₃ en aguas naturales.	150	..
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001	0.001
Hierro	Fe y Mn 0.30	Fe 0.30
Fluoruros como elemento	1.5	1.5
Magnesio	1.25	1.25
Mercurio	0.001	0.001
Nitratos como nitrógeno	5	5
Nitritos como nitrógeno	0.05	0.05
Nitrógeno protéico	0.10	0.10
Nitrógeno amoniacal	0.50	..
Oxígeno consumido en:		
medio ácido	3	3
medio básico	3	..
Sólidos totales, pref. 500	1000	..
Cloruros como Cl- hasta	250	..
Sulfatos como SO ₄ = hasta	250	250
Plomo	0.10	0.05
Selenio	0.05	0.05
Zinc	15	5
SAAM (sustancias activas al azul de metileno)	..	0.5
ECC (extractable carbón-cloroformo)	..	0.30
ECA (extractable carbón-alcohol)	..	1.5
<u>Caracteres biológicos</u>		
Coliformes totales:		
NMP/100 ml, o filtración en membrana	2	2
Coliformes fecales	0	0
Organismos de los grupos:		
coli y coliforme/litro	20	..
Colonias bacterianas /cm ³ en placa de agar	< 200	..
Colonias bacterianas licuantes de la gelatina cromógenas o fétidas/cm ³	ausencia	..

parámetro importante en la toma de decisiones al momento de definir la elaboración de un proyecto, por ser un parámetro de control en la operación de plantas de potabilización en aquellas zonas donde se encuentra en altas concentraciones. Asimismo, los sólidos disueltos totales y los cloruros también deben de ser tomados en cuenta por ser consecuencias conocidas [41].

Por otra parte, las guías para la calidad del agua potable en relación con las aguas subterráneas de la Organización Mundial de la Salud (O.M.S.), son el criterio internacional en cuanto a normas se refiere, para fijar o comparar los límites establecidos a nivel nacional. En muchos casos una política de protección de las aguas subterráneas no esta orientada a prevenir todo tipo de contaminación. Entonces surge la interrogante de saber que cantidad de contaminación se puede tolerar. Por tal razón, las diferentes normas o guías para la potabilidad del agua se tornan, en efecto, en los criterios de diseño para el control de la contaminación de las aguas subterráneas. Por tanto, es relevante discutir de que manera las actuales guías de la OMS sobre Calidad del Agua Potable se refieren directamente a las aguas subterráneas. Al hacerlo es importante apreciar que estas guías se basan en dos criterios separados: su importancia para la salud (efecto tóxico, carcinogénico, mutagénico) que es de primera prioridad, y los aspectos organolépticos o estéticos (sabor, color, olor) que son de importancia secundaria, siempre que se garantice que el consumidor aceptará el agua y no acudirá a una fuente aparentemente mejor, pero de mayor riesgo para la salud pública [31].

Entre los constituyentes inorgánicos mencionados en las guías como nocivos para la salud, el más generalizado y problemático es el nitrato, debido a su alta movilidad y estabilidad en los sistemas aeróbicos de aguas subterráneas. Otros constituyentes tales como fluoruros y, en menor grado, arsénico, se encuentran en las aguas subterráneas pero frecuentemente por causas de origen natural.

Los metales pesados peligrosos (cadmio, cloro, plomo, mercurio) tienden a ser inmovilizados por precipitación, u otros procesos, en muchos acuíferos, pero migran significativamente en sistemas de aguas subterráneas con bajo pH y Eh. Muchos de los constituyentes inorgánicos mencionados en las normas por motivos estéticos se encuentran ampliamente en las aguas subterráneas, a menudo por causas naturales y en algunos casos debido a la contaminación; los más notables entre estos son cloruro, hierro, manganeso, sodio y sulfato.

En cuanto a los constituyentes orgánicos, se debe reconocer que los valores actuales de las guías aún no cubren la vasta gama de compuestos orgánicos sintéticos, especialmente con respecto a los plaguicidas, conocidos por ser contaminantes potenciales del agua. Esto se debe a que no existe una suficiente evidencia médica como para hacer firme recomendación. Entre aquellos compuestos para los que se han registrado valores guías como resultado de su significado para la salud los que, según la evidencia actual, parecen representar la amenaza más grande para la calidad de las aguas subterráneas, son algunos de los alcanos, alquenos y bencenos clorados, que son relativamente solubles en el agua y una vez en el subsuelo no experimentan gran retardo o rápida degradación. Estos compuestos son solventes sintéticos y desinfectantes que tienen un uso muy difundido en toda la escala de industrias. Irónicamente, estos no representan una seria amenaza para el agua superficial debido a su elevada volatilidad, pero las pérdidas volátiles de las aguas subterráneas son relativamente limitadas.

Solo algunos de los plaguicidas nombrados presentan una evidencia concreta de ser una amenaza sobre la calidad del agua subterránea debido a que muchos muestran una alta sorción en los suelos, aunque hasta el momento sólo se ha realizado limitado monitoreo y poca investigación. Sin embargo, se conoce que otros compuestos son móviles en las aguas

subterráneas, pero, debido a una insuficiente evidencia médica, aún no se ha fijado ningún valor límite. En la Tabla 3.2 se enlistan algunos de los parámetros de las guías de la O.M.S. para la calidad de el agua potable.

Con respecto a la calidad microbiológica, las guías actuales de la OMS recomiendan que debe considerarse que un suministro no es satisfactorio si se detectan bacterias indicadoras, coliformes fecales, en cualquier muestra de 100 ml. Para algunos tipos de suministro de agua se puede tolerar la presencia de las bacterias coliformes totales en niveles de hasta 10/100ml en muestras esporádicas. Algunos especialistas en salud pública consideran que estas guías son innecesariamente severas como para ser adoptadas en países en desarrollo, sobre todo para pequeños suministro de aguas subterránea no tratados ni entubados, debido al costo desproporcionado para alcanzar tales estándares en relación con otros riesgos para la salud pública.

También se cuestiona la relevancia del recuento de coliformes totales debido a la existencia relativamente difundida de organismos coliformes no fecales en las aguas subterráneas poco profundas de países tropicales.

TABLA 3.2 GUÍAS DE LA OMS PARA LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE (1984) Y SU RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

CONSTITUYENTES INORGÁNICOS			CONSTITUYENTES ORGÁNICOS		
CONSTITUYENTE (mg/l)	VALOR	CRITERIO	CONSTITUYENTE	VALOR	CRITERIO
Aluminio (Al)	0.2	E	Benceno y derivados		
Amonio (NH ₄ -N)	0.01	E	benceno	10.0	S
Arsénico (As)	0.5	S	benceno (a) pireno (PAH)	0.01	S
Cadmio (Cd)	0.005	S	clorobencenos	0.1	E(S)
Cloruro (Cl)	250.0	E			
Cobre (Cu)	1.0	E	Alcanos alogenados		
Cromo (Cr)	0.05	S	1.2 dicloroetano	10.0	S
Cianuro (CN)	0.1	S	tetracloruro de carbono	3.0	S
Detergentes (ABS)	0.2	E	cloroformo	30.0	S
Fluoruro (F)	1.5	S			
Hierro (Fe)	0.3	E	Alquenos halogenados		
Plomo (Pb)	0.05	S	1.1 dicloroetileno	0.3	S
Manganeso (Mn)	0.1	E	tricloroetileno	30.0	S
Mercurio (Hg)	0.001	S	tetracloroetileno	10.0	S
Nitrato (NO ₃ -N)	10.0	S			
Selenio (Se)	0.01	S	Fenoles halogenados		
Sodio (Na)	200.0	E	2,4,6, triclorofenol	0.1 (10)	E(S)
Sulfato (SO ₄)	400.0	E	pentaclorofenol	0.1 (10)	E(S)
Zinc (Zn)	5.0	E			
			Compuestos pesticidas		
			aldrin/dieldrin	0.03	S
			clorodano	0.03	S
			DDT (diclorodifeniltricloroetano)	1.0	S
			HCB (hexaclorobenceno)	0.01	S
			heptacloro/epóxico	0.1	S
			HCH (lindano)	3.0	S
			metixicloro	30.0	S
			2.4 D (ácido dicloro-fenoxiacético)	100.0	S

NOTA: Se omitieron parámetros compuestos tales como conductividad eléctrica (CE), Sólidos disueltos totales (SDT), pH, etc: por considerarse que tienen principalmente importancia estética.

S: De consideración para la salud (tóxico, carcinogénico, mutagénico)

E: Aspectos estéticos (sabor, olor, color)

Podría decirse que las normas mexicanas se apegan en su mayoría a los valores guías de la O.M.S. en sus valores máximos, sin embargo, para apegarse a una realidad nacional, se

les debe de hacer una revisión a través de un comité legalmente reconocido que se encargue en forma permanente de la revisión, modificación y actualización y en el cual participen personal técnico del sector salud, de la SARH, SEDESOL, organismos operadores, sociedades y asociaciones nacionales e internacionales relacionados con el sector agua potable. Mediante éstas reuniones de trabajo se llegaría a determinar cuales parámetros podrían anexarse o quitarse y cuales son las concentraciones más adecuadas como límites permisibles para los diversos tipos de abastecimiento tales como: agua que ha recibido tratamiento, la que se entregue cruda y la que se entrega embotellada.

Es conveniente que al hacer la revisión de las normas, a algunos parámetros se les considere valores máximos deseado y permisible para dar margen a una mayor seguridad del cumplimiento de la calidad de agua de consumo [41]

3.2.2 AGUAS PARA LA AGRICULTURA

Existen muchas razones por las cuales resulta imposible fijar unos límites en las concentraciones de los elementos disueltos en el agua para riego, entre ellas:

- a) que las plantas tienen unas tolerancias muy variables respecto a la salinidad del agua y;
- b) que su reacción frente a los componentes salinos depende de las condiciones climáticas, el método de riego y el tipo de suelo.

Además es importante la relación entre los distintos tipos de iones; existen influencias antagónicas entre iones tales como el Na^+ y el Ca^{++} ; entre el boro y los nitratos; entre el selenio y los sulfatos. Por otra parte, se puede dar el hecho de que el correcto drenaje de un suelo sea más importante que la composición del agua de riego. Aún cuando se use agua de excelente calidad, puede ocurrir que tierras mal drenadas dejen de producir, mientras que, en el otro extremo, se dan casos de suelos bien drenados que producen buenas cosechas aunque estén regados con aguas relativamente cargadas de sales [41].

Cabe señalar, en general, tres grupos de componentes en las aguas de irrigación susceptibles de originar problemas. Tales grupos se corresponden más o menos con los efectos perjudiciales y son:

- a) total de sales disueltas.
- b) sustancias que se encuentran en pequeñas concentraciones, y
- c) ciertos aniones y cationes

Conviene indicar que los elementos que, generalmente, se encuentran en pequeñas concentraciones, son, entre otros, el Ba, Si, F, S, P, Fe, y los elementos traza Al, As, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Li, Mn, Hg, Mo, Ni, Se, Va y Zn. Aparecen además iones: nitrito (NO_2^-) y amonio (NH_4^+) y materia orgánica. Entre los aniones y cationes que no solo contribuyen al total de la salinidad, sino que tienen un importante efecto en relación con el carácter del suelo, se encuentran los de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ y K^+ , y también los CO_3^- , CO_3H^- , SO_4^- , Cl^- y NO_3^- .

Se comprende que tanto los aniones y cationes como los elementos en forma de trazos, entran a formar parte del total de sales disueltas, cuyo efecto es fundamentalmente el osmótico.

De acuerdo con estos tres grupos de componentes, y dada la imposibilidad de establecer estándares fijos, se ha optado por establecer clasificaciones más o menos arbitrarias de las aguas para riego. En general, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), considera tres categorías: clase I: "excelentes a buenas", o también "aceptables en la mayor parte de los casos"; clase II: "buenas o perjudiciales", o bien "perjudiciales para algunas plantas bajo ciertas condiciones", y, finalmente, clase III:

"perjudiciales o inutilizables", o bien, "perjudiciales para la mayor parte de las plantas en las mayor parte de las ocasiones".

Desde un punto de vista práctico, las clasificaciones se basan en diversos índices (algunos de los cuales se obtienen por combinación entre las concentraciones de los diversos iones mencionados), que son los siguientes:

- Salinidad total.
- Porcentaje de Na.
- Índice RAS (Relación de Absorción de Sodio).
- Contenido de Boro.
- Contenido de Cloruros.
- Contenido de Sulfatos.
- Conductividad eléctrica.

En la Tabla 3.3 se presentan a manera de explicación las diferentes clasificaciones de agua para riego de acuerdo a su calidad.

TABLA 3.3: CLASIFICACIÓN DE AGUAS PARA RIEGO EN RELACIÓN A SU CALIDAD

CALIDAD	Salinidad Total (mg/l)	Porcentaje de sodio (%)	Índice RAS (meq/l)	Contenido de Boro (mg/l)	Contenido de Cloruros (mg/l)	Contenido de Sulfatos (mg/l)	Conductividad eléctrica (microhmos/cm)
I. Excelentes a buenas o bien aceptables en la mayor parte de los casos.	Menos de 70	Menos de 30-60 %	Menor de 8	Menos de 0.5, aunque ciertas plantas no sufren con 1-1.5	Menos de 70-190	Menos de 130-320	Menos de 1000
II. Perjudiciales para algunas plantas bajo ciertas condiciones	Entre 350 y 2100	Entre 30 y 75 %	Entre 8 y 15	Entre 0.5 y 2, aunque hasta 3.35 puede ser satisfactoria para ciertas plantas.	Entre 70 y 560	Entre 130 y 640	Entre 500 y 3000
III. Perjudiciales para la mayor parte de las plantas en la mayor parte de las ocasiones	Más de 1750-2100	Más de 70-75 %	Mayor de 15	Más de 2, si bien más de 1 es muy perjudicial para ciertas plantas	Más de 210-560	Más de 380-640	Más de 2500-3000

3.2.3 AGUAS PARA LA INDUSTRIA

Las aplicaciones del agua en la industria son tan variadas como numerosas. El agua se utiliza como un ingrediente más con otras materias primas en el producto terminado, o bien como un medio de transporte dentro de la fábrica, como un agente de lavado y refrigeración, y también como fuente de vapor de agua en la producción de energía.

En lo que respecta a la calidad exigida por la industria para las aguas que utiliza, es

necesario puntualizar en primer lugar que las exigencias son enormemente variables de unas industrias a otras, y que por ello es imposible establecer estándares o normas generales, como se ha hecho en el caso de las aguas de abastecimiento doméstico.

En general, cabría afirmar que gran parte de los procesos industriales pueden utilizar sin problemas el agua que es apta para abastecimiento urbano; sin embargo, algunos de esos procesos -por ejemplo, la preparación de alimentos o bebidas, o la fabricación de pantallas de televisión- pueden necesitar agua de mayor calidad que la utilizada para beber, aunque también se da frecuentemente el caso de que las exigencias de calidad para el agua industrial son mínimas.

Con todo, existe un aspecto muy importante en el abastecimiento de aguas en una industria: las concentraciones de los diversos componentes han de ser lo más constantes posible. El hecho de que un agua tenga una calidad relativamente mala, suele ser menos importante de que la misma se mantenga constante a lo largo del tiempo, puesto que el primer problema se puede resolver con la instalación de la adecuada planta de tratamiento, mientras que las variaciones bruscas de calidad requieren una constante atención y originan gastos muy elevados.

En la Tabla 3.4 se muestran algunos parámetros y sus rangos de concentraciones recomendadas según el proceso industrial en el cual intervengan.

TABLA 3.4 RANGO DE LAS CONCENTRACIONES LÍMITES RECOMENDADAS PARA LAS AGUAS DE PROCESOS INDUSTRIALES

Empleo	PARÁMETROS														
	Turbidez unid.	Color unid.	Umbral de sabor y olor	Sólidos disueltos	Dureza exp. en CaCO ₃	Alcalinidad exp. en CaCO ₃	pH unid.	Cloruros exp. como Cl	Sulfatos exp. como SO ₄	Hierro exp. como Fe	Manganeso exp. como Mn	Hierro más Manganeso	Sulfuro de Hidrógeno	Fluoruros exp. como F	Otras exigencias
Aire acondicionado			Bajo							0.5	0.5	0.5			No debe ser corrosivo ni fomentar la formación de fangos
Panadería	10	10	Ninguno-bajo		a					0.2	0.2	0.2	0.2		Potable
Alimentación de calderas															Potable si se emplea vapor en la preparación de alimentos.
Cervecería	0-10	0-10	Ninguno-bajo	500-1500 b	c	75-80 d	6.5-7.e	60-100		0.1	0.1	0.1	0.2	1.0	Potable; otros muchos requisitos.
Bebidas carbonatadas	1-2	5-10	Ninguno-bajo	850	200-250	50-130		250	250	0.1-0.2	0.2	0.1-0.4	0-0.2	0.2-1.0	Potable; COD 1.5; materia orgánica infinitesimal; algas y protozoos ninguno
Vestimenta			Bajo	50-100			<7.0			0.2	0.2	0.2	0.2		Potable
Industrias Lácteas		Ninguno	Ninguno	500 i	180			30	60	0.1-0.3	0.03-0.1				Potable; NO ₃ -N, 5.5; NO ₂ -N, 0; NH ₃ -N, tan solo trazas; COD y KMnO ₄ , 12
Bebidas	5	15	3; inofensivo	500				250	250	0.3	0.05			1.4 2.4 g	Potable
Conservación y congelación de alimentos	1-10		Ninguno-bajo	850	h	30-250	≥7.5			0.2	0.2	0.2-0.3	1.0	1.0	Potable; exento de orgs. saprofiticos; NaCl 1000-1500 NO ₃ -N, 2.8; NH ₃ -N, 0.4

TABLA 3.4 RANGO DE LAS CONCENTRACIONES LÍMITES RECOMENDADAS PARA LAS AGUAS DE PROCESOS INDUSTRIALES (CONTINUACIÓN)

Empleo	P A R Á M E T R O S														
	Turbidez unid.	Color unid.	Umbral de sabor y olor	Sólidos disueltos	Dureza exp. en CaCO ₃	Alcalinidad exp. en CaCO ₃	pH unid.	Cloruros exp. como Cl	Sulfatos exp. como SO ₄	Hierro exp. como Fe	Manganeso exp. como Mn	Hierro más Manganeso	Sulfuro de Hidrógeno	Fluoruros exp. como F	Otras exigencias
Proceso de alimentos en general	1-10	5-10	Bajo	850	10-250	30-250	-	-	-	0.2	0.2	0.2-0.3	-	1.0 l	Potable
Fabricación de hielo	5	5	Bajo	170-1300	-	-	-	-	-	0.2	0.2	0.2	-	-	Potable, SiO ₂ , 10
Lavandería	-	-	-	-	0-50	60	6-6.8 e	-	-	0.2-1.0	0.2	0.2-1.0	-	-	-
Papel y pulpa, finos	10	5	-	200	100 j	75	-	-	-	0.1	0.05	-	-	-	SiO ₂ libre, 20; CO ₂ libre, 10; Cl ₂ residual, 2
Papel, pasta de madera	50	30	-	500	200	150	-	75	-	0.3	0.1	-	-	-	SiO ₂ soluble, 50; CO ₂ libre, 10
Papel Kraft blanqueado	40	25	-	300	100	75	-	200	-	0.2	0.1	-	-	-	SiO ₂ soluble, 50; CO ₂ libre, 10
Papel Kraft sin blanquear	100	100	-	500	200	150	-	200	-	1.0	0.5	-	-	-	SiO ₂ soluble, 100; CO ₂ libre, 10
Papel, pastas a la sosa y al sulfato	25 k	5	-	250	100 l	75	-	75	-	0.1	0.05	-	-	-	SiO ₂ soluble, 20; CO ₂ libre, 10
Producción de fibras de rayón y acetato, y pulpas	5	5	-	100 f	8	50-75	-	-	-	0.05	0.03	0.05	-	-	Al, 8; Si, 25; Cu, 5
Manufacturas de rayón	0.3	-	-	-	55	-	7.8-8.3	-	-	0.0	0.0	0.0	-	-	-

TABLA 3.4 RANGO DE LAS CONCENTRACIONES LÍMITES RECOMENDADAS PARA LAS AGUAS DE PROCESOS INDUSTRIALES (CONTINUACIÓN)

Empleo	P A R Á M E T R O S														
	Turbidez unid.	Color unid.	Umbral de sabor y olor	Sólidos disueltos	Dureza exp. en CaCO ₃	Alcalinidad exp. en CaCO ₃	pH unid.	Cloruros exp. como Cl	Sulfatos exp. como SO ₄	Hierro exp. como Fe	Manganeso exp. como Mn	Hierro más Manganeso	Sulfuro de Hidrógeno	Fluoruros exp. como F	Otras exigencias
Industria azucarera			-	Bajo	Bajo	-	-	20	20	0.1			-	-	Ca, 20; Mg, 10; bicarbonato expresado como CaCO ₃ , 100, estéril, ningún organismo saprofítico
Curtido	20	10-100	-	-	50-500	130	6.0-8.0	-	-	0.1-0.2	0.1-0.2	0.2	-	-	Dureza de bicarbonato, baja
Equipo de alimentación, lavado	1	5-20	Ninguno	850	10	-	-	250	-	-	-	0.1	-	1.0	Potable; materia orgánica, infinitesimal.
Textiles	0.3-25	0-70	-	-	0-50	-	-	100	100	0.1-1.0	0.05-1.0	0.2-1.0	-	-	DQO, 8; metales pesados, ninguno; Ca, 10; Mg, 5; bicarbonato como CaCO ₃ , 200

NOTA: A menos que se indique lo contrario, las unidades se expresan en mg/l.

a: Se precisa algo de calcio para la acción de levaduras. Una dureza demasiado elevada retrasa la fermentación, pero si es demasiado baja reblandece el gluten y produce un pan muy húmedo. Para la fermentación de algunos productos de confitería se necesita agua de dureza cero.

b: No más de 300 mg/l de cualquiera de estas sustancias.

c: No más de 100-500 mg/l de CaSO₄; No más de 50-200 mg/l de MgSO₄.

d: En el caso de la cerveza negra, la alcalinidad expresada en CaCO₃ puede oscilar entre 80-150 mg/l.

e: Rango, límites inferior a superior.

f: Sólidos totales.

g: El límite de tolerancia depende de la media anual de las temperaturas diarias máximas del aire durante un mínimo de cinco años.

h: Para legumbres, 25 a 75; para fruta y productos hortícolas, 100 a 200; para guisantes, 200 a 400.

i: Se sabe por experiencia que 1.5 mg/l de fluoruro puede ocasionar fragilidad y resquebrajamiento de hielo.

j: Dureza de calcio, 50.

k: Sin contener arenilla.

l: Dureza de calcio, 50; dureza de magnesio, 50 [41].

3.3 LEGISLACIÓN

Las sociedades de los países en vía de desarrollo se han dado cuenta de que es inaplazable para ellos su industrialización, como una necesidad de supervivencia, ya que han quedado rezagados de aquellos países que los superaron por más de una década en el avance tecnológico, lo que lesiona muy gravemente su ya incipiente economía.

En nuestro país se ha considerado inaplazable promover su industrialización en todas sus formas, pero también está consciente de que una de las consecuencias más graves de la era industrial es la alteración nociva de el hábitat humano como efecto de la contaminación ambiental.

El desarrollo de las actividades socioeconómicas de México ha originado un incremento substancial de las demandas de agua; asimismo, esto ha generado grandes volúmenes de aguas residuales, las cuales, en la mayoría de los casos, son descargadas sin ningún tratamiento, ocasionando grandes problemas al medio ambiente. Esta problemática ha creado la necesidad de llevar a cabo estudios dirigidos a profundizar en el conocimiento que presentan las cuencas hidrológicas del país, con el fin de preservarlas y controlar su contaminación, para que el recurso hídrico no sea un factor que limite el desarrollo de nuestro país.

Fue por eso que a principio de la década de los setenta, se realizaron acciones y estrategias dirigidas a prevenir y controlar la contaminación del agua.

Para llevar a efecto esta tarea, se hizo necesario establecer los mecanismos jurídicos en que se sustentarían las obligaciones de los ciudadanos para cumplir con los ordenamientos que fijaran las leyes y sus reglamentos y así alcanzar los objetivos establecidos.

Con tal fin, se encuentran en vigor la Ley de Aguas Nacionales, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente así como las Normas Oficiales Mexicanas y las Condiciones Particulares de Descarga,

3.3.1 ANTECEDENTES

La Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental, publicada el 12 de marzo de 1971, vino a complementar deficiencias existentes en nuestra legislación, la que no contaba con un instrumento jurídico que regulara los problemas de contaminación ambiental y propusiera medidas de control. Asimismo, los problemas de contaminación ambiental, para esas fechas, eran ya importantes, pero solo conocidos por los estudiosos del tema.

La Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental dedicaba el capítulo tercero a la prevención y control de la contaminación de aguas que marcaba en sus artículos 14 al 22 las disposiciones generales en que se basó el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de marzo de 1973, el cual vino a complementar lo establecido por la Ley Federal de Aguas promulgada el 30 de Diciembre de 1971.

Poco más de 11 años después, y tomando en cuenta una gran cantidad de experiencias obtenidas, de la puesta en marcha, y aplicación de la Ley, se publica el 11 de enero de 1982, la Ley Federal de Protección al Ambiente, la cual modifica y adiciona a la anterior, quedando integrada por 13 capítulos, a diferencia de la primera que sólo tenía cinco.

El primero de marzo de 1988 entra en vigor la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, derogando a la Ley Federal de Protección al Ambiente. Esta Ley consta de seis títulos principales, con 194 artículos y 4 más, transitorios; dedica su título cuarto a la Protección al Ambiente, donde legisla en el capítulo 3 del mismo, lo

correspondiente a la Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos. Hasta 1988, la vigilancia del cumplimiento de ésta Ley correspondía a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, pero en mayo de 1992 se creó la Secretaría de Desarrollo Social, la cual vino a sustituirla, adoptando así sus injerencias.

Por otra parte el primero de diciembre de 1992 se creó la Ley de Aguas Nacionales, sustituyendo a la Ley Federal de Aguas promulgada el 30 de Diciembre de 1971. La Ley de Aguas Nacionales responde, por otra parte, a las corrientes más modernas de pensamiento, en las que predomina como objetivo hacer uso eficiente de los recursos naturales, principalmente el agua, así como preservar su calidad y cantidad.

De acuerdo a esta Ley, corresponde al Ejecutivo Federal la autoridad y administración en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, quien la ejercerá directamente o a través de la Comisión Nacional del Agua, la cual contará con un Consejo Técnico integrado por los titulares de las Secretarías de Hacienda y Crédito Público; de Desarrollo Social; de la Contraloría General de la Federación; de Energía, Minas e Industria Paraestatal; de Agricultura y Recursos Hidráulicos, quién lo presidirá; de Salud y de Pesca.

La Ley de Aguas Nacionales, que contiene diez títulos principales, con un total de 137 artículos, 13 de ellos transitorios, dedica por entero su Título Séptimo a la Prevención y Control de La contaminación de las Aguas.

Es de llamar la atención, que si bien no se han tenido avances espectaculares en el control de la contaminación del agua en el país, pese a la muy completa legislación al respecto, sí se ha logrado que la población en general este consciente de que existe un problema y exija la solución del mismo.

Es del conocimiento general y además notorio, que hasta la fecha no ha sido posible contener el avance de la contaminación de las aguas, causada principalmente por las aguas residuales municipales y las provenientes de procesos de tipo industrial, aunque el Gobierno Federal, a través de las autoridades encargadas de solucionar el problema, ha realizado todos los esfuerzos, acciones técnicas y jurídicas materialmente posibles.

Como resultado de las acciones técnicas llevadas a cabo por el Gobierno Federal, se han obtenido estudios y proyectos constructivos de plantas de tratamiento comunitarias, tendientes a la prevención y control de la contaminación de las aguas en forma regional, que han permitido evaluar los costos de tratamiento y demostrar que el tratamiento conjunto tiene, entre otros beneficios, una reducción substancial en los costos de tratamiento, comparado con el hacerlo de forma individual.

Estos proyectos han sido presentados a los responsables de descargas de aguas residuales como un aporte del gobierno federal para que se resuelva el problema, pero como anteriormente las multas no eran económicamente representativas y el procedimiento para aplicar las sanciones muy tardado, a cualquier responsable le resultaba más ventajoso pagar las infracciones que dar el tratamiento requerido.

Con todo esto se podría concluir que la legislación mexicana tiene por objeto fomentar lo que se denomina tecnología responsable: es decir una tecnología que no solo se preocupe por su avance y por los logros económicos derivados del mismo sino que también se preocupe por su buen uso, o sea propiciar que el hombre conciba el desarrollo industrial con la conservación de los Recursos Naturales.

Ley de Aguas Nacionales

Esta Ley ha adoptado la estrategia de dar a las aguas nacionales un nuevo enfoque económico y tecnológico para su adecuado aprovechamiento y uso racional.

Como punto de partida, la Ley de Aguas Nacionales introduce el concepto de agua como un recurso unitario que se renueva a través del ciclo hidrológico, y que es afectado por la actividad del hombre. Con ello se confirma la íntima relación entre las aguas superficiales y subterráneas, y se vincula la cantidad y calidad del recurso [1].

Dentro de este concepto, la cuenca y el acuífero constituyen unidades de gestión para instrumentar una regulación acorde con el interés general.

En las disposiciones preliminares de la Ley de Aguas Nacionales se precisa, como objeto de la Ley, no solo la regulación del uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, sino también, y con igual importancia, la preservación de su calidad, dentro de una concepción integral del recurso, con lo cual se corrige una de las grandes lagunas de la anterior legislación.

Por lo que se refiere a la administración del agua se precisan las facultades que el Ejecutivo Federal puede ejercer a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA). Asimismo, se consolida esta Comisión como la autoridad única en el ámbito federal en materia de cantidad y calidad del agua y se le dota con la necesaria autonomía técnica y administrativa que requiere para cumplir con su objetivo, sin perder de vista su carácter intersectorial.

Dada la importancia que tiene la prevención y control de la contaminación de las aguas, la Ley les dedica un título completo. El propósito es consolidar una sola autoridad en materia de calidad del agua.

Las disposiciones de esta ley, son, según el artículo 2º, aplicables a todas las aguas nacionales, sean superficiales o del subsuelo, entendiéndose por "aguas nacionales" las aguas propiedad de la Nación, en los términos del párrafo quinto del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Estas disposiciones también son aplicables a los bienes nacionales que se señalan en el artículo 113 de la Ley estudiada [42].

Asimismo, declara de utilidad pública: la protección mejoramiento y conservación de cuencas acuíferos, caucos y vasos y demás depósitos de propiedad nacional, así como la infiltración de aguas para reabastecer mantos acuíferos y la derivación de las aguas de una cuenca o región hidrológica hacia otras; la instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales y la ejecución de medidas para el reuso de dichas aguas, así como la construcción de obras de prevención y control de la contaminación del agua, y; la instalación de los dispositivos necesarios para la medición de la cantidad y calidad de las aguas nacionales.

De acuerdo a esta Ley, son atribuciones del Secretario de Agricultura y Recursos Hídricos:

- I.- Proponer al Ejecutivo Federal la política hidráulica del país;
- II.- Fungir como Presidente del consejo Técnico de la Comisión Nacional del Agua; y
- III.- Las que en materia hidráulica le asignen específicamente las disposiciones legales.

Asimismo, atribuye a la Comisión Nacional del Agua: Proponer los criterios y lineamientos que permitan dar unidad y congruencia a las acciones del Gobierno Federal en materia de aguas nacionales, y asegurar y vigilar la coherencia entre los respectivos programas y la asignación de recursos para su ejecución así como administrar y custodiar las aguas nacionales y los bienes nacionales a que se refiere en el artículo 113, y preservar y controlar la calidad de las mismas, así como manejar las cuencas en los términos de la presente ley.

También menciona como atribuciones de la Comisión Nacional del Agua, promover el uso eficiente del agua y su conservación en todas las fases del ciclo hidrológico, e impulsar

una cultura del agua que considere a este elemento como un recurso vital y escaso, y; vigilar el cumplimiento y aplicación de la Ley, interpretarla para efectos administrativos, y aplicar las sanciones y ejercer los actos de autoridad en la materia que no estén reservados al Ejecutivo Federal.

En cuanto a la organización y participación de los usuarios señala que la Comisión Nacional del Agua acreditará, promoverá y apoyará la organización de los usuarios para mejorar el aprovechamiento del agua y la preservación y control de su calidad, y para impulsar la participación de éstos niveles a nivel estatal, regional o de cuenca en los términos de la ley y sus reglamentos.

El Ejecutivo Federal a través de la Comisión Nacional del Agua otorgará las concesiones para el uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, cuya solicitud deberá contener - además del nombre del solicitante, cuenca, región, localidad, punto de extracción, volumen requerido, uso inicial que se dará al agua, plazo por el que solicita la concesión-, el punto de descarga y el proyecto de las obras a realizar o las características de las obras ya existentes para su extracción o aprovechamiento, así como las respectivas para la descarga.

Los concesionarios o asignatarios tendrán que sujetarse a las disposiciones generales y normas en materia de seguridad hidráulica y de equilibrio ecológico y protección al ambiente, de acuerdo al artículo 29 de esta Ley.

Es importante mencionar que esta ley trata de cubrir todo lo referente a la prevención y control de la contaminación de las aguas en su Título Séptimo, en el cual declara que es de interés público la promoción y ejecución de las medidas necesarias para proteger la calidad del agua, en los términos de la ley.

Señala que la Comisión Nacional del Agua tendrá a su cargo:

* La promoción y en su caso ejecución y operación de los servicios necesarios para la preservación y mejoramiento de la calidad del agua en las cuencas hidrológicas y acuíferos, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas respectivas y las condiciones particulares de descarga, en los términos de la ley. El control de las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje o alcantarillado de los centros de población, corresponde a los municipios, con el concurso de los estados cuando así fuere necesario y lo determinen las leyes según el artículo 88.

* Se encargará de formular programas integrales de protección de los recursos hidráulicos en cuencas hidrológicas y acuíferos, considerando las relaciones existentes entre los usos del suelo y la cantidad y calidad

En las zonas de riego y en aquellas zonas de contaminación extendida o dispersa, el manejo y aplicación de sustancias que pueden contaminar las aguas nacionales superficiales o del subsuelo, deberán cumplir las normas, condiciones y disposiciones que se desprendan de esta ley y su reglamento de acuerdo al art. 96. Además, la Comisión promoverá en el ámbito de su competencia, las normas o disposiciones que se requieran para hacer compatible el uso de los suelos con el de las aguas, con el objeto de preservar la calidad de las mismas dentro de un ecosistema, cuenca o acuífero.

* Establecer y vigilar el cumplimiento de las condiciones de particulares de descarga que deben satisfacer las aguas residuales que se generan en bienes y zonas de jurisdicción federal; de aguas residuales vertidas directamente en bienes nacionales, o en cualquier terreno cuando dichas descargas puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos; y en los demás casos previstos por la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

* Vigilar, en coordinación con las demás autoridades competentes, que el agua suministrada para consumo humano cumpla con las normas de calidad correspondientes, y que el uso de las aguas residuales cumpla con las normas de calidad del agua emitidas para tal

efecto.

* Promover o realizar las medidas necesarias para evitar que basura, desechos, materiales y sustancias tóxicas, y lodos producto de tratamiento de aguas residuales, contaminen las aguas superficiales o del subsuelo y los bienes que señala el artículo 113.

* Ejercer las atribuciones que corresponden a la Federación en materia de prevención y control de la contaminación del agua y de su fiscalización y sanción, en los términos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, salvo que corresponda a otra dependencia conforme a la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal.

La Comisión Nacional del Agua determinará los parámetros que deberán cumplir las descargas, la capacidad de asimilación y dilución de los cuerpos de aguas nacionales y las cargas de contaminantes que éstos pueden recibir, así como las metas de calidad y los plazos para alcanzarlas, mediante la expedición de Declaratorias de Clasificación de los Cuerpos de Aguas Nacionales, las cuales se publicarán en el Diario Oficial de la Federación, lo mismo que sus modificaciones, para su observancia. Para otorgar los parámetros la Comisión Nacional del Agua deberá tomar en cuenta la clasificación de los cuerpos de aguas nacionales, las normas oficiales mexicanas correspondientes y las condiciones particulares que requiera cumplir la descarga; podrá revocar o negar el permiso en caso de que las descargas afecten o puedan afectar fuentes de abastecimiento de agua potable o a la salud pública.

También deberá ajustarse a las normas oficiales mexicanas que al efecto se emitan, según el art. 91 de la ley, la infiltración de aguas residuales para recargar acuíferos, previo permiso otorgado por la Comisión Nacional del Agua

La Comisión Nacional del Agua de acuerdo al artículo 92 de la Ley de Aguas Nacionales, en el ámbito de su competencia, podrá ordenar la suspensión de las actividades que den origen a las descargas de aguas residuales:

- I.- Cuando no se cuente con el permiso de descarga de aguas residuales en los términos de esta ley;
- II.- Cuando la calidad de las descargas no se sujete a las normas oficiales mexicanas correspondientes, a las condiciones particulares de descarga o a lo dispuesto en esta ley su reglamento;
- III.- Cuando se deje de pagar el derecho por el uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la Nación como cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales; o
- IV.- Cuando el responsable de la descarga utilice el proceso de dilución de las aguas residuales para tratar de cumplir con las normas oficiales mexicanas respectivas o las condiciones particulares de descarga.

Según el art. 95, la Comisión Nacional del Agua, en el ámbito de la competencia federal, realizará la inspección o fiscalización de las descargas de aguas residuales con el objeto de verificar el cumplimiento de la ley. Los resultados de dicha fiscalización o inspección se harán constar en acta circunstanciada, producirán todos los efectos legales y podrán servir de base para que la Comisión Nacional del Agua y las demás dependencias de la Administración Pública Federal competentes, puedan aplicar las sanciones respectivas previstas en la ley.

La explotación, uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la Nación como cuerpos receptores de descargas de aguas residuales les motivará el pago del derecho que establece la Ley Federal de Derechos. El pago es independiente del cumplimiento de lo dispuesto en esta ley sobre la prevención y control de la calidad del agua; de lo dispuesto en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente; y en la Ley General de Salud de acuerdo al artículo 112.

La Comisión Nacional del Agua desde luego, tiene atribuciones para sancionar las faltas contenidas en el artículo 119 de la Ley estudiada, imponiendo multas que van desde 50 días de salario mínimo general vigente en el área geográfica y en el momento en que se cometa la infracción hasta 10000, dependiendo de la falta en que haya incurrido. Para sancionar estas faltas, las infracciones se calificarán tomando en consideración además de la falta en que haya incurrido:

I .- La gravedad de la falta.

II .- Las condiciones económicas del infractor; y

III.- La reincidencia.

En los casos que así lo ameriten según esta ley, la Comisión Nacional del Agua podrá imponer la clausura en el caso de incumplimiento de la orden de suspensión de actividades o suspensión del permiso de descarga de aguas residuales a que se refiere el artículo 92, caso en el cual podrá clausurar definitiva o temporalmente la empresa o establecimiento causantes directos de la descarga.

Como se puede ver, mediante esta Ley se redistribuyeron las facultades en la materia entre la SEDESOL -a quien compete fijar los criterios ecológicos para las condiciones de descarga- y la SARH -responsable de otorgar o revocar los permisos de descarga de aguas residuales en cuerpos receptores que sean bienes nacionales, y vigilar, por lo que toca al agua, el debido cumplimiento de las leyes en materia ecológica.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

En la nueva Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, aparecen preceptos importantes que regulan la participación de las tres esferas de gobierno. El Capítulo Segundo en sus artículos Cuarto, Quinto y Sexto, define el sistema de concurrencia entre los tres niveles de gobierno. Se dispone que la descentralización a las entidades federativas y los municipios de las facultades para prevenir y controlar la contaminación generada por aguas residuales vertidas a los sistemas de drenaje y alcantarillado y de establecer y aplicar las sanciones por infracción a las disposiciones que se refieren a asuntos de su competencia [43].

Con esta distribución de competencias, se pretende un cambio radical en la gestión de los asuntos ecológicos del país dentro de los cuales se encuentra la protección de la calidad del agua ya que, hasta ahora, las entidades federativas y los municipios carecían, casi totalmente, de facultades para resolver los problemas de contaminación que afectan a la población. Se evita así que la concentración de facultades y atribuciones que fue necesaria en un principio para orientar la acción del gobierno, se convierta en un obstáculo para la resolución de los problemas graves de contaminación del recurso.

Por lo que se refiere a la contaminación del agua y los ecosistemas acuáticos, se establecen los criterios para prevenir y controlar su contaminación y se especifican con una visión integral todos aquellos instrumentos y procedimientos en los que las autoridades habrán de aplicar dichos criterios.

Asimismo, el Artículo 114 establece las competencias exclusivas de cada dependencia federal en esta materia, así como aquellas que serán ejercidas en forma coordinada entre éstas. Se evita así la confusión que dificulta la convergencia de esfuerzos de las diversas dependencias, que en caso particular de la contaminación de las aguas pudiera suscitar la diversidad de ordenamientos vigentes.

Expuesto lo anterior, es importante señalar que las atribuciones en materia de prevención y control de la contaminación de aguas que tiene el Estado y que son objeto de ésta Ley, serán ejercidas de manera concurrente por la Federación, las Entidades Federativas y los Municipios.

El Artículo Quinto establece que son asuntos de alcance general de la nación o de interés de la Federación, según la fracción XV, el aprovechamiento racional y la prevención y el control de la contaminación de aguas de jurisdicción federal, conforme a esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, las disposiciones vigentes del derecho internacional y las normas que de dichas disposiciones se deriven y -de acuerdo a su Fracción XVIII- la regulación de las actividades relacionadas con la exploración y explotación de los recursos del subsuelo que el artículo 27 de la Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos reserva a la nación, en cuanto puedan originar desequilibrios ecológicos o daños al ambiente.

Por lo que hace a la competencia de los Estados y Municipios, se establece que les corresponde la regulación del aprovechamiento racional y la prevención y el control de las aguas de jurisdicción de los Estados. Además, la prevención y control de la contaminación de aguas federales que tengan asignadas o concesionadas para la prestación de servicios públicos y de las que se descarguen en las redes de alcantarillado de los centros de población, sin perjuicio de las facultades de la Federación, en materia de tratamiento, descarga, infiltración y reuso de aguas residuales.

Es importante señalar que la Secretaría de Desarrollo Social tiene atribuciones para formular los criterios ecológicos que deberán observarse en la prevención y control de la contaminación del agua, con la participación que corresponde a las Secretarías de Agricultura y Recursos Hidráulicos y de Salud.

En lo que respecta a este punto, el 13 de diciembre de 1989 se publicaron, en el Diario Oficial de la Federación, los criterios ecológicos de calidad del agua, mismos que precisan un total de 24 parámetros y 98 sustancias y grupos de sustancias que por sus efectos adversos sobre la salud humana o los ecosistemas, se han considerado como prioritarios. En estos criterios se establece la calidad mínima requerida para el uso o aprovechamiento del agua [2].

La Secretaría de Desarrollo Social también tiene atribuciones para establecer las condiciones de descarga de las aguas residuales de los sistemas de drenaje del Distrito Federal a los cuerpos receptores y para expedir coordinadamente con las Secretarías de Agricultura y Recursos Hidráulicos y de Salud, las normas oficiales para regular el alejamiento, explotación, uso o aprovechamiento de aguas residuales.

Al Departamento del Distrito Federal le corresponde aplicar las normas oficiales que expida la Secretaría de Desarrollo Social y la Secretaría de Salud, para regular las descargas de agua al sistema de drenaje y alcantarillado del Distrito Federal; asimismo establecer y desarrollar la política de reuso de aguas en el Distrito Federal, en coordinación con la Secretaría de Agricultura y Recursos hidráulicos.

En el período comprendido entre 1988 y 1991 se emitieron un total de 33 normas técnicas ecológicas para el control de las descargas de aguas residuales -de las actividades o servicios que las originan o depósitos que puedan causar desequilibrio ecológico o producir daños al ambiente- a cuerpos receptores, alcantarillado y reuso en el riego agrícola.

El 18 de Octubre de 1993 fueron publicadas las Normas Oficiales Mexicanas en el Diario Oficial de la Federación [44], y vinieron a sustituir a las Normas Técnicas Ecológicas; constituyen un avance en la cobertura de las disposiciones relativas a la materia, pues se establece que las actividades y servicios que originan descargas, depósitos que puedan causar desequilibrio ecológico o producir daños al ambiente o afectar los recursos naturales, la salud, el bienestar de la población, o los bienes propiedad del estado o los particulares, deberán

TABLA 3.5 INDUSTRIAS A LAS QUE SE REFIEREN LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS PARA DESCARGAR AGUAS RESIDUALES

Centrales termoeléctricas convencionales.
Industria productora de azúcar de caña.
Industria de refinación de petróleo crudo, sus derivados y petroquímica básica.
Industrias de fabricación de fertilizantes excepto las que produzcan ácido fosfórico como producto intermedio.
Industrias de fabricación de productos plásticos y polímeros sintéticos.
Industrias de fabricación de harinas.
Industria de la cerveza y de la malta.
Industrias de fabricación de asbestos de construcción.
Industria elaboradora de leche y sus derivados.
Industria de manufactura de vidrio plano.
Industria de productos de vidrio prensado y soplado.
Industria de fabricación de caucho sintético, llantas y cámaras.
Industria del hierro y el acero.
Industria textil.
Industria de celulosa y papel.
Industria de bebidas gaseosas.
Industria de acabados metálicos.
Industria de laminación, extrusión y estiraje de cobre y sus aleaciones.
Industria de impregnación de productos de aserradero.
Industria de asbestos textiles, materiales de fricción y selladores.
Industria del curtido y acabado de pieles.
Industria de matanza de animales y empaquetado de cárnicos.
Industria de envasado de conservas alimenticias.
Industria elaboradora de papel a partir de celulosa virgen.
Industria elaboradora de papel a partir de fibra celulosa reciclada.
Descargas de restaurantes o de hoteles.
Industria del Beneficio del café.
Industria de preparación y envasado de conservas de pescados y mariscos.
Industria de producción de harina y aceite de pescado.
Descargas provenientes de hospitales.
Industria de jabones y detergentes.
Industria, servicio, reparación y mantenimiento automotriz, gasolineras, tintorerías, revelado de fotografías y el tratamiento de aguas residuales.
Máximos permisibles de los contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para disposición mediante el riego agrícola.
Condiciones para el uso de aguas residuales de origen urbano o municipal en el riego agrícola.

observar los límites y procedimientos que se fijan en dichas normas.

En éstas, se continúa regulando la obligación de los usuarios de dar tratamiento a sus aguas residuales, previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo.

Las 33 Normas Oficiales Mexicanas y Criterios Ecológicos se refieren a: Límites máximos permisibles y procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales industriales a cuerpos de agua. Las industrias a que se hace referencia en las Normas Oficiales Mexicanas se muestran en la Tabla 3.5

La propia Ley otorga atribuciones a la Secretaría de Desarrollo Social, para dictaminar las solicitudes de permisos de infiltración o descarga de aguas residuales en terrenos o cuerpos distintos de los alcantarillados y para fijar condiciones particulares de descarga cuando se trate de aguas residuales generadas en bienes y zonas de jurisdicción federal y de aquellas vertidas directamente en aguas de propiedad Nacional [43].

Es prudente mencionar que la Secretaría de Desarrollo Social en coordinación con la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y la de Salud, les corresponde expedir las normas para el uso o aprovechamiento de aguas residuales; emitir la opinión a la que deberá sujetarse la programación y construcción de nuevas industrias que puedan producir descargas contaminantes de aguas residuales y expedir las normas oficiales mexicanas que deberán observarse para el tratamiento de aguas residuales de origen urbano que se destinen a la industria y a la agricultura.

En relación con lo anterior, en la práctica se ha demostrado dificultad para que se apliquen las disposiciones que se refieren a la coordinación entre dependencias federales, por esta razón, se

sugiere incluir en la ley el mecanismo de procedimiento para que realmente exista dicha coordinación, de lo contrario pierden sentido las intenciones del legislador al pretender una actividad conjunta para atacar el problema de la contaminación de las aguas.

Categorícamente se sigue mencionando que no se podrán descargar o infiltrar en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso de la autoridad federal o local correspondiente. Si los usuarios del agua cumplieran con esta obligación, seguramente ya se hubiera contrarrestado el efecto de contaminantes en cuerpos receptores, sin embargo no es así; para hacer valer estas deposiciones se requiere vigilar e inspeccionar permanentemente las fuentes contaminantes y sancionar a los infractores, pues se han presentado casos en que las aguas residuales contaminan fuentes de abastecimiento para las poblaciones, en cuyo caso se debe comunicar a la secretaría de salud y revocar el permiso de funcionamiento; así como suspender el suministro de agua.

El aspecto coercitivo para la aplicación de la Ley, es de suma importancia ya que una ley sin sanción no es ley. A este aspecto se dedica por entero el Título Sexto -Medidas de Control y de Seguridad y Sanciones- de la Ley en estudio que en su Artículo 171 establece que las violaciones a los preceptos de la ley, sus reglamentos o disposiciones que de ella emanen, constituyen infracción y serán sancionadas administrativamente por las autoridades Federales, Estatales o Municipales, en el ámbito de sus competencias, y conforme a las disposiciones locales que se expidan, con una o más de las siguientes sanciones [45]:

I.- Multa equivalente de 20 a 20,000 días de salario mínimo general vigente en el Distrito Federal en el momento de imponer la sanción;

II.- Clausura temporal o definitiva, parcial o total; y

III.- Arresto administrativo hasta por 36 horas.

Los actos administrativos que impongan sanciones podrán ser impugnados con el recurso de inconformidad.

En caso de reincidencia, el monto de la multa podrá ser hasta por dos veces el monto originalmente impuesto, sin exceder el doble del máximo permitido, así como la clausura definitiva.

Para la imposición de las sanciones por infracciones a esta ley, según el artículo 173 de la misma, se tomará en cuenta: la gravedad de la infracción, considerando principalmente el criterio de impacto en la salud pública y la generación de desequilibrios ecológicos; las condiciones económicas del infractor, y; la reincidencia, si la hubiere.

CAPÍTULO 4

ORÍGENES O FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Uno de los más importantes aspectos en el estudio de las aguas subterráneas son las fuentes o causas productoras de la contaminación. Los contaminantes pueden originarse de fuentes muy diversas, tanto que a veces es casi imposible atribuirlos a actividades específicas. Las fuentes y la naturaleza de la contaminación, así como las características de las aguas receptoras, determinarán en gran medida los efectos de ésta y las medidas que deberán tomarse para su control. Fundamentalmente, las aguas subterráneas sufren alteraciones en su calidad:

- a) De forma natural, debido al agua de lluvia, influencia del mismo suelo o por las características del terreno geológico.
- b) Debido a la actividad humana, por la introducción en ellas de sustancias químicas o de microorganismos producidos por ésta, o su interferencia cuantitativa en esquemas naturales de circulación a que da lugar el bombeo del recurso subterráneo.
- c) Por una combinación de ambas causas.

4.1 NATURAL

Un manto subterráneo puede adquirir sus características de calidad de muy diversas formas: puede ser alimentado por otro manto, por aguas superficiales, y directamente, por las lluvias; también interviene la composición del suelo y las características geológicas del terreno. El agua, en los dos primeros casos, tiene ya sus características químicas, que se podrían ver modificadas al contacto con el acuífero considerado. El agua de lluvia es mucho más pura y, por lo tanto, es más apta para enriquecerse en sales. Las diferentes sales y minerales que forman el suelo y subsuelo; influyen en las características del agua, ya que al entrar en contacto con ella se producen reacciones que, de acuerdo a las concentraciones de los minerales, dan al agua su calidad química.

4.1.1 EL AGUA DE LLUVIA

El agua de lluvia, no es en realidad, agua destilada, lleva ya disuelta una cierta cantidad de gases y sales, muy variable según el sitio.

Contiene en primer lugar los gases que disuelve en la atmósfera natural: nitrógeno y

argón, oxígeno anhídrico carbónico, cloro (particularmente cerca del mar). A estos gases hay que añadir los de procedencia "humana", que contiene la atmósfera por encima de las zonas habitadas y, sobre todo, industriales: óxido de carbono, anhídrido carbónico, anhídrido sulfuroso, anhídrido sulfúrico, ácido sulfhídrico, amoníaco, etc. [40].

La cantidad de gases disueltos será evidentemente proporcional a la solubilidad y a la presión parcial de los mismos, así como a la temperatura. Un gas como el CO_2 , -cuya solubilidad en el agua no es despreciable y aumenta cuando baja la temperatura- estará siempre presente en el agua de lluvia. Este hecho, dicho sea de paso, disminuye el pH del agua de lluvia y favorece la disolución por ella de los carbonatos.

Además de los gases, el agua de lluvia tiene disueltas una cierta cantidad de sales. La naturaleza y la concentración de estas son muy variables en función de su proximidad al mar o a núcleos industrializados, de la fuerza y dirección de los vientos, etc.

Los cloruros existen con una concentración de menos de 1 mg/l lejos del mar, pero dicha concentración aumenta hasta 10, 20 e incluso 80 mg/l en las zonas costeras y en el mar. Cuando hay tormentas cerca del mar, pueden observarse concentraciones todavía más fuertes (hasta más de 1 g/l)

Los sulfatos tienen también una concentración del orden de 1 a 3 mg/l, que pueden alcanzar 20 mg/l encima de zonas industriales e incluso marinas.

Los bicarbonatos tienen también frecuentemente concentraciones de algunos mg/l

También los cationes (sodio, potasio, calcio, magnesio, etc.), pueden existir en las aguas de lluvia, con concentraciones variables entre 0.5 y varias decenas de mg/l.

En resumen, en términos generales, las aguas de lluvia tendrán una salinidad total del orden de 5 a 10 mg/l encima de zonas sin contaminar, de 20 a 50 encima de núcleos urbanos, y de 50 a 100 en las zonas costeras.

4.1.2 INFLUENCIA DEL SUELO

En la superficie misma del suelo empieza ya la disolución de sales. Las aguas de lluvia recogidas sobre la superficie del suelo (en el sentido edafológico de la palabra) un día o dos después de las precipitaciones, suelen tener una salinidad total de cerca de 100 a más de 200 mg/l.

El clima también interviene, un clima templado o cálido y húmedo favorece evidentemente una cobertura vegetal, que puede propiciar una mayor concentración de bicarbonatos y de algunos metales, aunque las aguas suelen tener un bajo residuo seco. En cambio, en un clima árido, la evaporación incrementa de forma espectacular la concentración en sales de las aguas del suelo.

Sin embargo, es evidente que la mayor influencia es provocada por la naturaleza del suelo, y más concretamente la de su litología y su concentración en materias orgánicas y en organismos vivos. El suelo constituye un verdadero micro-laboratorio en el que se producen un sinnúmero de reacciones químicas y bioquímicas. Además de las disoluciones normales que puede producir el agua que se filtra, conviene hacer notar que, en un suelo, el aire intersticial contiene de 10 a 100 veces más de CO_2 que el aire exterior. La disolución de este gas da al agua un carácter ácido que favorece muchas reacciones, por ejemplo, la disolución de los carbonatos. Conviene asimismo, no ignorar la importancia del ciclo bioquímico de las plantas (que recogen ciertas moléculas y sueltan otras que transforman en otras las moléculas nitrogenadas, etc.). En resumen, el conjunto de las materias orgánicas, vivas o muertas favorece el enriquecimiento de las aguas por disolución, hidratación, hidrólisis y reproducción de ácidos nitrosos, nítricos, carbónicos y organismos de distinta índole.

4.1.3 INFLUENCIA DEL TERRENO GEOLÓGICO

Las aguas que circulan en las rocas cristalinas y metamórficas, o en los terrenos que proceden de su alteración, tienen generalmente un residuo seco débil, del orden de los 100 mg/l. Contienen una gran cantidad de sílice coloidal o no-, de carbonatos alcalinos, y alcalino-térreos, y de hierro. Teniendo exceso de CO_2 libre, al menos al principio, las aguas tendrán un pH ácido.

Sin embargo, las aguas que circulan en los productos de alteración de basalto o de esquistos pueden tener un residuo seco de medio gramo por litro, e incluso más. Llevan además muchos sulfatos cuando el esquistos es piritoso, caso frecuente.

Por lo que toca a las rocas sedimentarias, las arenas o areniscas silíceas -a pesar de la gran superficie de contacto- no proporcionan mucha salinidad a las aguas, que tienen un residuo seco bajo, de menos de 50 a unos 300 mg/l, con pH generalmente ácido, y grado hidrotimétrico muy pequeño (unos grados).

Las arenas o areniscas normales proporcionan a las aguas una salinidad más elevada, de 300 a más de 1000 mg/l, debido al hecho de que contienen más elementos solubles. En concentraciones variables pueden existir todos los aniones y cationes corrientes, según la composición del terreno. El pH es generalmente neutro o algo básico; la dureza puede ser de 20 a más de 50 grados.

Las arcillas y margas son muy porosas, han podido absorber una gran cantidad de sales, y son sede de circulaciones lentísimas. Por lo tanto, sus aguas son muy saladas (varios gramos/litro). La facie química general es cloro-sulfatada mixta, desde clorurada sódica hasta sulfatada calco-magnésiana.

Los aluviones, debido a su complejidad litológica (cantos, gravas, arenas, limos, con frecuentes intercalaciones arcillosas), albergan aguas de tipos y concentraciones muy variables. El residuo seco puede variar entre menos de medio gramo y varios gramos por litro. En general, las aguas tienen una facie catiónica mixta (sodio, calcio y magnesio) y una facie aniónica más diferenciada según la litología de la cuenca aluvial o de sus bordes: bicarbonatada cerca de relieves calizodolomíticos, cloro-sulfatada en las zonas aguas abajo, etc.

Los terrenos salíferos o yesíferos, tiene una gran cantidad de sales muy solubles, por lo que dan a las aguas una salinidad muy grande (de varias decenas a más de 300 g/l). Se puede incluso alcanzar el punto de saturación. Como la solubilidad del sulfato de calcio aumenta con la presencia de cloruros, las aguas cloruradas sódicas podrán tener más sulfatos y más calcio que las aguas sulfatadas cálcicas propiamente dichas.

En las dolomías -y, sobre todo, en las calizas- la parte esencial de la circulación se hace por las fisuras, y la superficie de contacto es bastante reducida. Por otra parte, estas rocas contienen generalmente pocas sales solubles: cloruros o sulfatos. Por lo tanto, las aguas tienen una facies bicarbonatada o carbonatada clara, con un residuo seco de 200 a 800 mg/l; el pH, siempre alcalino, varía entre algo más de 7 y cerca de 9; la dureza puede oscilar entre unos 15 y más de 50 grados.

Por otra parte, es evidente que los simples parámetros físicos modifican la concentración existente en las aguas, por ejemplo, la magnitud de las superficies de contacto entre el agua y las rocas, la longitud del recorrido y su duración. De ahí que las aguas que circulan en terrenos margosos sean mucho más saladas que las que lo hacen entre calizas.

4.2 ANTROPOGÉNICA

La contaminación de aguas subterráneas de tipo antropogénica se origina como consecuencia de las diversas actividades humanas. Por la introducción de elementos extraños en los mantos acuíferos subterráneos o por el bombeo excesivo o mal controlado.

Dentro de lo que hemos llamado interferencia cuantitativa del hombre en los esquemas naturales de circulación, se encuentra el caso de los acuíferos costeros en conexión hidráulica con el mar, o el de los acuíferos continentales de agua dulce, bajo los cuales - y separados por formaciones no completamente permeables- existen otros mantos de aguas muy cargadas de sales. Una extracción excesiva de agua subterránea en estos acuíferos puede acarrear una intrusión de agua salada y su mezcla con el agua dulce, tornando a esta inutilizable incluso para las aplicaciones menos exigentes.

El origen de la contaminación de aguas subterráneas por acciones antropogénicas se puede dividir en tres sectores: las aguas de desecho urbano, agrícola e industrial.

4.2.1 URBANA

El desarrollo urbano, y los líquidos y sólidos residuales que produce son causas potenciales de contaminación. Los sistemas individuales de eliminación -por ejemplo, los pozos negros e incluso las fosas sépticas- pueden causar problemas, así como el vertido de las aguas residuales sobre el terreno o en ramblas y barrancos. El agua residual puramente doméstica, que después de un tratamiento adecuado, e incluso a veces sin él, puede ser muy adecuada para regar, ha de ser estrechamente vigilada si se dedica a este fin; en parte, para evitar que el suelo pierda su capacidad autodepuradora, y además, para conseguir que las plantas absorban la mayor cantidad posible de nutrientes. También es importante el uso de agua residual doméstica tratada para la recarga artificial de un acuífero con objeto de mejorar el aprovechamiento de los recursos hídricos, el control se ha de hacer más estricto, con el fin de evitar la degradación de estos recursos.

En la Tabla 4.1 se presenta una lista de las principales consecuencias de actividades urbanas que originan contaminación de aguas subterráneas, su categoría de distribución y los principales tipos de contaminantes que se originan de esta actividad [46].

En lo que respecta a los residuos sólidos urbanos -que en muchas ocasiones aparecen mezclados con residuos industriales y se vierten frecuentemente sin gran consideración por los aspectos medioambientales-, pueden constituir focos de intensa contaminación puntual de las aguas subterráneas. Ello se debe a la enorme carga de sales, microorganismos, materia orgánica y gases disueltos, que el agua de lluvia o las aguas superficiales arrastran consigo hacia el acuífero subterráneo, al entrar en contacto con la masa de basura sin cubrir e infiltrarse en el mismo vertedero o en sus inmediaciones [40].

En relación con las aguas residuales municipales, su generación es importante en el contexto nacional y está definitivamente unida a la cobertura de servicios de agua potable y alcantarillado con que cuentan las poblaciones [2].

Dicha cobertura se ha visto favorecida en los grandes asentamientos urbanos, mientras que en las zonas rurales y las pequeñas ciudades muestran un rezago significativo.

La población de la república mexicana ha mostrado una fuerte inclinación (60%) a concentrarse en las grandes ciudades. La mayor parte de las actividades industriales del país y que disponen de una mayor cobertura en los servicios de agua potable y alcantarillado constituyen las fuentes principales de generación de aguas residuales; los ejemplos más claros

son las zonas localizadas en torno a las ciudades de México, Monterrey y Guadalajara, las cuáles generan 46, 8.5 y 8.2 m³/s de aguas residuales respectivamente, que corresponden al 34% del total generado en el país, calculado en 184 m³/s, de los cuales 105 corresponden a la población y 79 a la industria.

TABLA 4.1 PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN URBANA

FUENTES	CATEGORÍA DE DISTRIBUCIÓN	PRINCIPALES TIPOS DE CONTAMINANTES
SANEAMIENTO SIN ALCANTARILLADO	U/R, P-D	n, f, o
FUGAS DE DESAGÜES	U, P-L	o, f, n
LAGUNAS DE OXIDACIÓN DE DESAGÜES	U/R, P	ó, f, n
APLICACIÓN DESAGÜES AL SUELO	U/R, P-D	n, s, o, f
DESCARGAS DESAGÜES AL RÍO	U/R, P-L	n, o, f
LIXIVIACION DE RELLENOS BASUREROS	U/R, P	o, s, h
ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES	U/R, P-D	o
DRENAJE POR SUMIDEROS	U/R, P D	s, o

Principales fuentes de contaminación urbana, puede incluir componentes industriales.
 P- contaminación puntual L- contaminación lineal D- contaminación difusa
 n- compuestos nutrientes f- patógenos fecales h- metales pesados
 o- compuestos microrgánicos y/u carga orgánica s- salinidad
 U- Urbana R- Rural

Las expectativas en cuanto a la generación de aguas residuales indican que, para el año 2000, se producirán 207 m³/s, de los cuales 118.4 corresponderán a la población y 89.4 a la industria.

Evidentemente esta situación representa un enorme compromiso para la población y el gobierno, en su esfuerzo para prevenir y controlar el deterioro del cada vez más valioso recurso hídrico del país.

La población del país en 1987 (70 millones de habitantes) se dividía en 70% población urbana y 30% población rural, distribuida en 125,300 poblaciones. Cabe destacar el asentamiento del 50.73% de la población total en únicamente 98 de las 125,300 poblaciones [5].

Por lo que respecta a los servicios de agua potable y alcantarillado, debe citarse que la cobertura para población urbana es de 76% en agua potable y 65% en alcantarillado, mientras que para la población rural es de 49% en agua potable y 12% en alcantarillado. (Tabla 4.2).

TABLA 4.2 COBERTURA DEL SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO EN MÉXICO

SERVICIO	COBERTURA URBANA (%)	COBERTURA RURAL (%)	TOTAL NACIONAL (%)
AGUA POTABLE	76	49	68
ALCANTARILLADO	65	12	49

De lo anterior se concluye que 25.3 millones de habitantes no tienen acceso al servicio de agua potable y 40.1 al de alcantarillado.

Las localidades que concentran la mayor proporción de habitantes concentran también la mayoría de actividades industriales de la nación y disponen de mayor cobertura de servicios de agua potable y alcantarillado, constituyéndose así en las fuentes principales de generación de aguas residuales, siendo ejemplos las zonas localizadas entorno a las ciudades de México, Monterrey y Guadalajara.

El estudio de Alfredo Faud, concluye que a nivel nacional se genera una carga contaminante total en términos de DBO de 2'359,274.3 ton/año, correspondiendo 846,216.4 ton/año al sector urbano con un 35.87%.

Para el tratamiento de aguas residuales municipales, el país cuenta actualmente con 361 plantas de tratamiento, con una capacidad instalada de 29.10 m³/s [2].

De lo anterior se desprende que de la descarga total de aguas residuales municipales que es de 105 m³/s solo se tiene capacidad para tratar 24%, además de que aproximadamente la mitad del volumen tratado es para reuso y no para el control de la contaminación.

Ahora bien, no todos los sistemas de tratamiento operan eficientemente (se estima que solo el 50% opera regularmente), por lo que las cifras en cuanto a capacidad instalada no muestran la realidad en cuanto al manejo de las aguas residuales domésticas.

Aunado a lo anterior, existe el problema de los sistemas de alcantarillado, que como se mencionó anteriormente la población del país cuenta con un nivel del servicio de 49%, siendo las localidades rurales las más afectadas por la falta de este servicio, por lo cual han recurrido al uso de fosas sépticas, aunque en mínimo porcentaje.

Asimismo, se ha determinado que, debido principalmente a la falta de autosuficiencia económica y financiera, no ha sido posible ampliar la cobertura del servicio de alcantarillado como sería deseable y menos aún la implantación de sistemas de tratamiento. Otros problemas no menos graves son la falta de personal capacitado para la operación y mantenimiento de las instalaciones de alcantarillado y tratamiento de aguas.

En las plantas municipales existentes predominan los procesos a base de lagunas de estabilización y de lodos activados.

4.2.2 AGRÍCOLA

El impacto de las prácticas agrícolas modernas sobre la calidad de las aguas subterráneas se hizo totalmente evidente en algunos países industrializados durante la década de los 70's. La existencia de altas tasas de lixiviación de nitrato y otros iones móviles de muchos suelos sometidos a continuas siembras, sostenidas por aplicaciones de grandes cantidades de nitratos, cloruros y, posiblemente, trazas de otros elementos y de compuestos orgánicos en las aguas subterráneas, es la posible consecuencia de las excesivas aplicaciones de efluentes, lodos o desperdicios animales sobre las tierras cultivadas. Por otro lado, las

tierras de pastoreo no pierden mucho nitrato por lixiviación, a menos que estén excesivamente abonadas e intensivamente pastadas por animales [31].

Por otra parte, la expansión en forma rápida del uso de fertilizantes inorgánicos en todas las naciones como un esfuerzo para incrementar la producción agrícola por lo que numerosos suelos cultivados, los cambiará de ser invariablemente deficientes en nutrientes (excepto donde la ausencia de humedad limita el crecimiento de plantas), a tener un exceso intermitente de nutrientes. No se ha establecido aún que condiciones de suelos, regímenes climáticos y sistemas de cultivo son los más vulnerables a lixiviación de nutrientes, aunque según el autor las regiones costeras calizas, entre otras, parecen ser muy sensibles en este aspecto.

El empleo de plaguicidas e insecticidas puede resultar a largo plazo peligroso para las aguas subterráneas, así como la utilización de excesivas cantidades de abonos y fertilizantes que suele plantear problemas de acumulación de nutrientes en dichas aguas. Sin embargo, especialmente en regiones áridas y semiáridas, el problema más importante es la progresiva mineralización de las aguas subterráneas que se debe a los procesos de disolución de sales y a las prácticas de riego [40].

La contaminación agrícola se distingue por su carácter no puntual, ya que sus efectos se extienden sobre zonas muy amplias. Aunque existen otras formas de contaminación, debida a las actividades de campo, que pueden considerarse como fuentes puntuales; por ejemplo, la producción de excrementos de ganado cuando este se encuentra en régimen de estabulación; el almacenamiento de fertilizantes y pesticidas en puntos en que puedan ser disueltos por el agua de lluvia, etc.

En lugares en que el agua residual es la fuente principal de irrigación, esta práctica puede causar un aumento en la salinidad de las aguas subterráneas, y de las concentraciones de nitrato y microcontaminantes orgánicos. En la Tabla 4.3 se enlistan las principales fuentes de contaminación agrícola [31].

El impacto de la agricultura irrigada sobre las aguas subterráneas puede ser aún más dramático. En algunas zonas áridas con suelos permeables, el cultivo de las tierras con sistemas ineficientes de irrigación ha creado, en efecto, un recurso nuevo de agua subterránea. Entonces, los esfuerzos para reducir las pérdidas de agua reducirán la dimensión de este recurso e incrementarán su salinidad. La sobreirrigación puede causar grandes incrementos en el nivel freático y resultar en una salinización del suelo y del agua subterránea proveniente de la evapotranspiración freática directa. Aún más, la infiltración salina hacia las aguas subterráneas puede ocurrir durante la habilitación inicial, y el manejo subsiguiente de los suelos irrigados, por la aplicación excesiva de agua superficial. Respecto al sector agropecuario en el país, las superficies en producción agrícola de riego y temporal acumuladas en los años 1982, 1985 y 1990 totalizan 19.3, 20.6 y 22.9 millones de hectáreas respectivamente, de acuerdo con la información y las experiencias del Plan Nacional Hidráulico [2].

En cuanto a la demanda de agua y generación de aguas residuales se observa que en 1980 se extrajeron 44,760 millones de m^3 , cifra que, de acuerdo con algunas estimaciones, se habrá incrementado para los años 1990 y 2000 a 69,542 y 92,380 millones de m^3 respectivamente.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

TABLA 4.3 PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN AGRICOLA

FUENTES	CATEGORÍA DE DISTRIBUCIÓN	PRINCIPALES TIPOS DE CONTAMINACIÓN
a: CULTIVO DEL SUELO		
CON QUÍMICOS AGRÍCOLAS	R, D	n, o
IRRIGACIÓN	R, D	n, o, s
CON LODOS	R, D	n, o, s
IRRIGACIÓN CON AGUAS RESIDUALES	R, D	n, o, s, f
b: CRIA DE GANADO/PROCESO DE COSECHAS		
LAGUNAS DE EFLUENTES	R, P	f, o, n
DESCARGA EFLUENTES AL SUELO	R, P-L	n, s, o, f
DESCARGA EFLUENTES AL RÍO	R, P D	o, n, f

Principales fuentes de contaminación agrícola la intensificación presenta el principal riesgo de contaminación.

P- contaminación puntual

L- contaminación lineal

D- contaminación difusa

n- compuestos nutrientes

f- patógenos fecales

h- metales pesados

o- compuestos microrgánicos y/u carga orgánica

s- salinidad

R- Rural

No obstante la diversidad de técnicas de riego utilizadas en el país, se estima un consumo de 82% del agua aplicada, lo que nos proporciona un indicador de la generación de aguas residuales provenientes de esta fuente, la cual se estima en las siguientes cifras anuales:

1980: 8056.8 millones de metros cúbicos

1990: 8345.0 millones de metros cúbicos

2000: 11085.0 millones de metros cúbicos

Evidentemente las aguas de retorno agrícola constituyen una fuente de contaminación muy importante, cuyo impacto se ha manifestado ampliamente en el país, sobretudo en el elevado porcentaje de cuerpos de agua que se encuentran en condiciones de eutroficación.

En México no se dispone de información suficiente respecto a las demandas de agua e índices de generación debido a los escasos trabajos realizados en el campo de la actividad pecuaria; sin embargo, en la zona de La Piedad se ha observado que se utilizan de 10 a 15 litros de agua por kilogramo de estiércol producido y que en promedio se generan dos kilos de excremento por cabeza cada día, considerando un peso promedio de los cerdos en la granja de 70 kilos.

La mezcla final de residuos líquidos tiene las características siguientes:

pH.....	8
DBO.....	2495
DQO.....	5200
Sólidos totales.....	5582
Sólidos suspendidos.....	5200
Sólidos sedimentables.....	15
Conductividad eléctrica....	4740

Sin embargo, dado que la actividad de crianza porcina del país representa actualmente un aspecto crítico en cuanto al deterioro ambiental y sanitario en las regiones donde se practica (debido a la agresividad de los desechos que produce, al escaso o nulo tratamiento que reciben y a la inadecuada disposición final que se hace de los mismos), se han realizado grandes esfuerzos en todo el país para resolver este problema.

La producción de ganado porcino se desarrolla preponderantemente, en los estados de Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán, Sonora y Veracruz, observándose un crecimiento constante. En los últimos años la porcicultura se ha visto afectada fundamentalmente por una creciente disminución en la demanda, por lo que en estos momentos opera por debajo de su capacidad instalada.

En forma específica, el corredor comprendido entre las poblaciones de Abasolo Guanajuato, y La Piedad, Michoacán, se ha caracterizado por ser el lugar de mayor relevancia en el nivel nacional, desde el punto de vista de la generación de contaminantes por la actividad porcícola del país.

El incremento de la industria porcícola alcanzado en la región se debe primordialmente a la ubicación de dicho corredor entre las zonas agrícolas del Bajío y la ciénega de Chapala, así como al hecho de encontrarse en el centro del país, lo que permite el fácil acceso a los dos principales mercados: el Distrito Federal y su zona conurbada y la ciudad de Guadalajara, en Jalisco.

4.2.3 INDUSTRIAL

Las fuentes de contaminación debidas a la industria son, en su mayor parte, de tipo puntual, es decir, se encuentran bien localizadas en un área generalmente reducida. En ocasiones, las aguas residuales industriales se eliminan mediante pozos o sondeos de inyección, y también en estanques o balsas de infiltración, favoreciendo con esto la incorporación del contaminante a las aguas subterráneas. En las balsas de evaporación u oxidación tienen a menudo lugar fugas e infiltraciones no previstas [40]. Las principales fuentes de contaminación industrial se muestran en la Tabla 4.4 [31].

Cuando existen escombreras o depósitos de residuos sólidos el agua de lluvia puede lixiviar ciertos componentes y después infiltrarse con ellos en solución hacia el manto acuífero.

Por otra parte, los procesos de producción, almacenamiento y transporte llevan asociados una serie de accidentes -fugas, rotura de tuberías, sucesos de tráfico, etc.-, que pueden también ser causa de contaminación [40].

Uno de los problemas en lo que se refiere a las fuentes de contaminación por desechos industriales, es la dificultad para establecer como se descargan los efluentes. Esto sucede donde partes de un proceso industrial generan efluentes por separado, donde parte de la carga total del efluente está siendo removida del lugar por alcantarillado o por transporte a un lugar

lejano de disposición, o donde está siendo descargada al suelo a través de infiltración por lagunas, fosas, sumideros ciegos, etc [46].

Después de la década de los treinta, puede decirse que se inicia el crecimiento rápido del México moderno. Posteriormente, en la década de los cuarenta empieza el proceso de industrialización del país, proceso que crecería a un ritmo anual de alrededor de 8% hasta el final de la década de los setenta en que entra, junto con muchos países, en el proceso de recesión de la economía mundial [2].

Durante esas cuatro décadas de crecimiento, la planta industrial gestada se concentró principalmente en las ciudades de México, Monterrey y Guadalajara.

Este crecimiento se dio relegando a segundo término las consideraciones sobre costo y dificultades de abastecimiento de agua, habiéndose observado una serie de efectos derivados de tal situación, entre los que sobresalen la competencia por el uso de fuentes de abastecimiento con el sector urbano y el consiguiente encarecimiento de los servicios.

TABLA 4.4 PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN INDUSTRIAL

FUENTES	CATEGORÍA DE DISTRIBUCIÓN		PRINCIPALES TIPOS DE CONTAMINANTES
a:INDUSTRIA EN GENERAL			
FUGAS DE TANQUES/TUBERÍAS	U,	P-D	o, h
DERRAMES ACCIDENTALES	U,	P-D	o, h
LAGUNAS DE EFLUENTES	U,	P	o, h, s
APLICACIÓN DE EFLUENTES AL SUELO	U,	P-D	o, h, s
DESCARGA EFLUENTES AL RÍO	U,	P-L	o, h, s
LIXIVIACIÓN DE BOTADORES	U/R,	P	o, h, s
DRENAJE POR SUMIDEROS	U/R,	P	o, h
PRECIPITACIONES AÉREAS	U/R,	D	s, o
b:EXTRACCIÓN DE MINERALES			
MODIFICACIÓN RÉGIMEN HIDRÁULICO	R/U,	P-D	s, h
DESCARGA DE AGUA DEL DRENAJE	R/U,	P-D	h, s
LAGUNAS DE RELAVES	R/U,	P	h, s
LIXIVIACIÓN DE BASUREROS	R/U,	P	s, h

Principales fuentes de contaminación industrial, puede ocurrir también en áreas no industriales

P- contaminación puntual

L- contaminación lineal

D- contaminación difusa

n- compuestos nutrientes

f- patógenos fecales

h- metales pesados

o- compuestos microrgánicos y/u carga orgánica

s- salinidad

U- Urbana

R- Rural

Por otra parte, el uso del agua como vehículo de desechos contaminantes y la poca importancia dada a su manejo y disposición, ha convertido a este sector en un elemento fundamental que debe ser considerado en las medidas de control a tomar para la preservación del recurso hidráulico cuya disponibilidad se ve comprometida en amplias zonas del país.

El sector industrial genera, a nivel nacional, 82 m³/s de aguas residuales de muy variados tipos y características [1]. En México, dicho sector se encuentra clasificado en 39 grupos, habiéndose identificado, de acuerdo con los índices de extracción, consumo y contaminación, los señalados en la Tabla 4.5 como los más importantes dentro de este contexto [2].

Tales giros corresponden en conjunto prácticamente a 82% del total de las aguas residuales generadas por el sector, destacando las industrias azucarera y química con 59.8%

Sin embargo, considerando no solamente los volúmenes de agua manejados, sino las circunstancias locales en las cuales se desenvuelve la industria, se han establecido como las más importantes en el ámbito de la prevención y control de la contaminación del agua en México, las siguientes: azúcar y alcohol, refinación de petróleo y petroquímica, papel y celulosa, curtiduría, química, textil y alimentaria.

TABLA 4.5 PRINCIPALES GIROS INDUSTRIALES RESPONSABLES DE LAS MAYORES DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

INDUSTRIA	Porcentaje		
	EXTRACCIÓN	CONSUMO	DESCARGA
Azucarera	35.2	22.3	38.8
Química	21.7	24.4	21.0
Papel y celulosa	8.2	16.1	6.0
Petróleo	7.2	3.7	8.2
Bebidas	3.3	6.4	2.4
Textil	2.6	2.4	2.7
Siderúrgica	2.5	5.5	1.7
Eléctrica	1.5	4.7	0.7
Alimentos	0.2	0.3	0.2
Resto del sector	0.17	14.1	18.1

México, para el tratamiento de aguas residuales industriales, cuenta actualmente con 282 plantas con una capacidad aproximada de 20 m³/s, desprendiéndose con esto que, del gasto total de aguas residuales que es de 79 m³/s, solo se trata 25.3 %.

Además de esto, no todos los sistemas de tratamiento operan eficientemente (se estima que solo el 50% opera regularmente), por lo que estas cifras podría decirse que son solo teóricas.

En la mayoría de las plantas de tratamiento industriales existentes predominan los procesos de lodos activados con coagulación química.

4.3 OTRAS

Existen además varios casos que, por tener una personalidad propia, no se han encuadrado en ninguno de los casos anteriores. Entre ellos cabe considerar la contaminación de las aguas subterráneas por las aguas de superficie [40].

Tal contaminación tiene lugar cuando los ríos han recogido una serie de aguas residuales de cualquier procedencia y discurren por zonas en que parte o toda el agua se infiltra y pasa al manto. Cuando los excedentes de la regulación de un río se utilizan para recargar un manto acuífero con objeto de mejorar el aprovechamiento de los recursos hídricos totales, si el agua de río lleva elementos nocivos puede producirse -como ya vimos al hablar de la recarga con aguas residuales urbanas- un grave problema en lugar del beneficio pretendido.

Por último, la producción, el almacenamiento, el transporte, el empleo y la eliminación de materiales radiactivos pueden constituir una amenaza para la calidad de las aguas, aunque el riesgo es más remoto gracias a las precauciones que normalmente se toman.

CAPÍTULO 5

TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN MANTOS ACUÍFEROS

Es importante aclarar que cualquiera de los métodos de detección de contaminación en mantos acuíferos por sí solo no reúne todas las características necesarias para llevar a cabo estudios de investigación de la calidad del agua subterránea a un nivel importante, cada uno se complementa con otro u otros para que el resultado obtenido sea satisfactorio y válido según las necesidades; la elección de los métodos depende de las características de la investigación a realizar.

5.1 ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS

Los tipos de estudios varían de acuerdo con los objetivos que se persiguen, no se utilizarían los mismos métodos para localizar un acuífero capaz de suministrar agua potable a un núcleo urbano de 1000 habitantes, que si se trata de determinar las condiciones de calidad del agua en el subsuelo [47].

Los estudios de agua subterránea serán tan completos como su finalidad lo exija. El informe y los mapas del hidrólogo mostrarán donde se puede obtener agua, qué clase de agua existe químicamente y, de un modo muy general cuanta hay disponible [48].

Los estudios hidrogeológicos generales pueden constar de mapas litológicos estructurales, mapas de isopiezas; a veces también de isotransmisibilidades, de oscilaciones de niveles piezométricos, de isopacas de los acuíferos, de profundidad de la zona saturada, de concentraciones iónicas, etc. [47].

Normalmente los límites de la zona estudiada coinciden con los de una cuenca hidrográfica o los de una unidad hidrogeológica. Es importante hacer un inventario detallado de pozos y fuentes, y además realizar frecuentemente algún tipo de prospección geofísica, sondeos mecánicos, ensayos de bombeo y análisis químico y a veces, algún pozo experimental.

Los estudios hidrogeológicos generalmente se auxilian de técnicas tales como: recopilación de información, métodos geológicos, métodos geofísicos, estudios climatológicos, métodos de hidrología de superficie y métodos hidroquímicos.

Los mapas geológicos, topográficos y las fotografías aéreas constituyen uno de los elementos básicos para el estudio de las aguas subterráneas. En algunas ocasiones, cuando no se dispone de datos hidrológicos, constituyen el único punto de apoyo para hacer deducciones hidrogeológicas. Se debe contar con personal capaz de plantearse los problemas

de la localización y movimiento de las aguas subterráneas cuando se examine el mapa topográfico o geológico o las fotografías aéreas de la zona a estudiar. Con base en esto, se deben formular hipótesis y saber programar las operaciones necesarias para comprobar cual puede ser la hipótesis verdadera.

La cartografía geológica permite determinar, con mayor o menor precisión según los casos, los límites y tipos de las principales unidades hidrogeológicas.

Los perfiles geológicos y los diagramas tridimensionales son muy útiles para adquirir una visión adecuada de la geometría de los acuíferos.

En los estudios generales o de detalle, suele ser conveniente representar en mapas separados algunas dimensiones o límites de los acuíferos. Los mapas de isobatas del techo o muro del acuífero indican, mediante curvas de nivel, los límites superior o inferior de la formación considerada. Se obtienen mediante extrapolación -realizada con criterio geológico- de los datos puntuales de los sondeos mecánicos, geofísicos y de la cartografía de superficie. Por ejemplo, un mapa de isobatas del muro de un acuífero permite conocer la máxima profundidad que deberá preverse para la perforación de un nuevo pozo. Los mapas de isopacas presentan las zonas en las que el acuífero tiene el mismo espesor; se obtienen por diferencia entre las isobatas del techo y muro en los acuíferos cautivos y de las isopiezas y las isobatas del muro en los acuíferos libres. Estos mapas son útiles para determinar las zonas de mayor espesor del acuífero; también se utilizan para conocer el volumen del acuífero que multiplicado por la porosidad eficaz, indica las reservas o volumen de agua que contiene en un instante determinado.

Por otra parte, el uso de fotografías en este tipo de estudios es de gran utilidad ya que constituye un excelente mapa base para los trabajos de campo, además, su visión estereoscópica permite identificar con nitidez detalles importantes de la red hidrográfica; características litológicas o morfológicas de directo interés para las aguas subterráneas como son: llanura aluviales, conos de eyección, volcanes y coladas volcánicas, dunas, formas cársticas, etc.

Los datos básicos sobre los parámetros geométricos e hidrológicos de un embalse subterráneo y sobre su funcionamiento se obtienen fundamentalmente mediante una red de pozos de observación y/o piezómetros, de los que se pueden obtener los datos siguientes: espesor total o parcial de él o los acuíferos y sus oscilaciones de nivel; el valor aproximado de su permeabilidad o transmisividad y su coeficiente de almacenamiento y la obtención de muestras de agua para determinar su calidad.

Otros datos importante son los referentes a la recarga y descarga natural de un acuífero, donde se encuentran las áreas de recarga en relación con la localización propuesta de los pozos, cuanta agua puede penetrar al acuífero bajo diversas condiciones de precipitación y uso de la tierra [48].

Como conclusión, los estudios hidrogeológicos nos dan una idea de las características principales del acuífero. Con el conocimiento de estas características se puede proyectar la amplitud que un problema de contaminación del manto de agua subterráneo puede alcanzar, su movimiento, posibles puntos en los que se debe de tener cuidado al planear descargas de alguna sustancia que pueda constituir un contaminante, y si la contaminación ya existe poder determinar sus posibles fuentes y su magnitud.

5.2 APLICACIÓN DE TRAZADORES

La técnica de los trazadores se basa en añadir al agua alguna sustancia (trazador) que se pueda identificar y medir con facilidad y que al mismo tiempo sea capaz de moverse a su misma velocidad constituyendo así una manera directa de seguir el movimiento del agua subterránea. Los trazadores pueden ser añadidos artificialmente o pueden tener un origen natural como algunos radioisótopos [47].

El movimiento de los trazadores no siempre es sencillo, pues está sujeto a los fenómenos de dispersión, a la interacción con el terreno y a los fenómenos de destrucción, ya sea por desintegración radiactiva o por inestabilidad química. Por ello es preciso disponer de criterios que permitan relacionar el movimiento y llegada de un trazador con la velocidad del agua.

Las técnicas de trazadores permiten no sólo determinar la velocidad de movimiento del agua subterránea y su dirección sino que permiten determinar porosidades del medio, permeabilidades relativas, estudio de la anisotropía y heterogeneidad de los acuíferos, mezclas de agua y velocidades de tránsito, etc., unas veces como métodos independientes de los puramente hidrodinámicos y que sirven para confirmarlos, y otras como los únicos métodos disponibles. En trabajos de contaminación pueden ser los métodos más directos y mejores para estudiar sus efectos.

Las técnicas de trazado no siempre son de aplicación e interpretación sencillas y pueden resultar más caras que las hidrodinámicas, pero no por ello pierden utilidad. Su empleo por personal inexperto o con desconocimiento de sus principios básicos ha sido objeto en ocasiones de fracasos y abandonos, pero frecuentemente resulta de utilidad conocer el acuífero y el comportamiento de los trazadores y se puede hacer una correcta reinterpretación de datos por el personal adecuado.

La elección del trazador más idóneo no solo depende de lo que se desee realizar sino del terreno, distancia a recorrer, tiempo de residencia, equipo de medición disponible, etc.

Muchos trazadores son nocivos, química y/o radiactivamente y es preciso que su concentración en el acuífero no rebase en ningún momento los límites establecidos, lo cual puede ocasionar un problema de detección y precisión en su medida.

Un trazador ideal es aquel que se mueve a la misma velocidad del agua, para ello se precisa que se cumplan una serie de condiciones, como por ejemplo: que no interaccione con el terreno, no se separe del agua (no se precipite ni sea retenido por filtración mecánica) y sea estable químicamente y biológicamente en ésta; que pueda ser añadido al agua sin alterar las propiedades físicas y químicas de la misma ni las del acuífero y que no contamine permanentemente el terreno después de efectuado el ensayo.

Además debe de bastar con utilizar pequeñas cantidades del trazador y que si ha de actuar disuelto sea de elevada solubilidad y se pueda detectar aún a muy bajas concentraciones de forma cuantitativa; debe ser de fácil manejo, barato y fácil de obtener y no ser tóxico ni molesto, y en lo posible, que no exista en el agua a trazar y que el terreno no lo aporte naturalmente.

No existe ningún trazador que pueda considerarse ideal en todos sus aspectos prácticos y entonces es preciso elegir entre los diferentes trazadores disponibles aquel que presente mejores características para la experiencia y menos complicaciones o riesgos.

Los trazadores que pueden emplearse son muy diversos, aunque en cada caso sólo son útiles algunos de ellos. En una primera clasificación pueden establecerse los siguientes tipos:

- * Trazadores sólidos en suspensión.
- * Trazadores químicos solubles electrolitos fuertes.
- * Trazadores químicos colorantes
- * Trazadores radiactivos
- * Trazadores isotópicos estables

TRAZADORES SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN

Los trazadores sólidos en suspensión sólo tienen aplicación cuando el agua circula en grandes grietas como en el caso de conductos kársticos muy desarrollados.

En general se utilizan sustancias que se mantienen más o menos fácilmente en suspensión. La determinación se puede realizar por simple inspección ocular o midiendo su concentración por filtración de volúmenes conocidos de muestra y posteriormente pesar o medir volumen, también mediante de un recuento con microscopio.

TRAZADORES QUÍMICOS SOLUBLES ELECTROLITOS FUERTES

Los trazadores químicos solubles son aquellos que disueltos en el agua permiten identificarla fácilmente. En este grupo no se incluyen los colorantes. El más utilizado es el ion cloruro añadido como ClNa o bien ClNH_4 o Cl_2Ca .

El dicromato sódico ($\text{Cr}_2\text{O}_7\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es bastante soluble, pues a 0°C se pueden disolver 238 kg/l de producto hidratado. El dicromato puede considerarse como un trazador colorante.

Otros posibles trazadores de este son el Li^+ como ClLi , el NH_4^+ como ClNH_4 , el I^- como IK , etc. En general los trazadores aniónicos (Cl^- , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, I^- , etc.) son mejores que los catiónicos (Li^+ , NH_4^+ , Na^+ , Ca^{2+} , etc.) ya que estos interaccionan con facilidad en el terreno.

Es posible encontrar referencias del uso de otros trazadores químicos solubles inorgánicos u orgánicos tales como bromoformo, fenol, azúcares, complejos cianurados, etc. y algunos detergentes de uso comercial. Muchas veces se han elegido como trazadores debido a su incorporación involuntaria al agua (contaminación). Los azúcares y los detergentes biodegradables pueden ser parcialmente destruidos por microorganismos.

TRAZADORES QUÍMICOS COLORANTES

Este grupo de trazadores es de uso muy generalizado por ser fácilmente solubles, detectables muchas veces a concentraciones de solo 10^{-3} ppm y en general las aguas naturales no los contienen. Su determinación puede hacerse con facilidad en el laboratorio con fluorímetros o fotocolorímetros y se pueden reconcentrar en el campo o en el laboratorio. Algunos de ellos pueden ser alterados o destruidos por diversos tipos de acciones tales como la agresión por el CO_2 , cambios de pH, acciones de los microorganismos del terreno, etc.

Las sustancias colorantes de uso más generalizado son : fluoresceína ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{O}_5$), uraninina o fluoresceína soluble. El carbón activado retiene la fluoresceína, hecho que se utiliza en su detección.

Otros colorantes utilizados de uso más restringido son:

- En solución alcalina y para aguas algo alcalinas: la Rhodamina B ($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_3\text{Cl}$) y su variedad Rhodamina WT; Sulforhodamina (o Pentacyl Brilliant Pink en sus variedades B y G)
- En aguas ácidas: Azul de anilina y Azul de metileno

TRAZADORES RADIACTIVOS

Los trazadores radiactivos forman un grupo de gran interés e importancia, de tal forma que son indispensables en muchas aplicaciones.

Los trazadores más comúnmente empleados son: Tritio (T o 3H); Iodo (I^{131}); Bromo-82 (Br^{82}); Cobalto-60 (Co^{60}); Cromo-51 (Cr^{51}) y algunos otros que han sido utilizados en casos especiales como Fósforo-32 (P^{32}); Azufre-35 (S^{35}); Sodio-24 (Na^{24}) y Oro-198 (Au^{198}). Otros radioisótopos tienen menos interés y su empleo solo ha sido ocasional en determinadas circunstancias. El Ca^{45} -EDTA puede ser útil en aguas predominantemente cálcicas, el Fe^{59} -EDTA en aguas muy mineralizadas y el $(CN)_2Ag^{110}Na$ en terrenos arcillosos con agua marina. Otros tienen su interés en su origen natural (C^{14}) o en su aporte accidental (Sr^{90} , Cs^{137} , etc.).

TRAZADORES ISOTÓPICOS ESTABLES

Los trazadores isotópicos estables son aquellos que suponen una variación en la composición isotópica del agua o de alguna de las sustancias que tienen habitualmente disueltas; tales son el D, O^{18} , C^{13} , etc. Su difícil detección, elevado costo y alteración por cambios isotópicos reducen mucho su interés, que queda limitado al trazado natural.

5.3 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Los métodos geofísicos dan medidas *in situ* indestructibles de propiedades físicas, eléctricas o geoquímicas del suelo o roca, natural o contaminado.

Las mediciones geofísicas pueden ser hechas relativamente rápido, incrementando de ese modo la densidad de muestra. Debido a la densidad de muestras más grande, las condiciones anómalas son más probables de detectar, por lo que se obtiene una caracterización más precisa de las condiciones del subsuelo [49].

Los métodos geofísicos, como cualquier otro medio de medición, tienen ventajas y limitaciones. Simplemente no existe un método geofísico aplicable universalmente, y algunos métodos son totalmente para un sitio específico en su funcionamiento. Así, se debe tener cuidado en seleccionar el método o métodos y su aplicación en condiciones locales específicas y requerimientos de proyecto.

El éxito de los métodos geofísicos depende de la existencia de un contraste suficiente entre las propiedades medidas del objetivo y las condiciones del subsuelo. Si no existe un contraste moderable, el objetivo no será reconocido. Similarmente, si una capa es suficientemente delgada o si el tamaño del objetivo es pequeño, no se detectará.

Las técnicas geofísicas no son nuevas; han sido usadas por décadas en la exploración de aceite y gas, exploración mineral, aplicaciones geotécnicas y desarrollo de recursos regionales de agua. Las técnicas geofísicas, aplicadas a investigaciones en sitios de desechos peligrosos, son algo diferentes en sus aplicaciones debido a que usualmente requieren para producir más alta resolución datos a pequeñas profundidades. En menos de una década, el desarrollo extensivo en la instrumentación geofísica de campo, técnicas analíticas, y frecuentemente el procesamiento por computadora han provocado una impresionante mejora en la capacidad para obtener una alta resolución de las condiciones del subsuelo a poca profundidad.

Los métodos geofísicos detectan áreas anómalas que pueden plantear problemas potenciales y cuando se usan de esta manera, son esencialmente detectores de estas áreas.

Una vez que la caracterización total del sitio ha sido hecha usando métodos geofísicos e identificadas las zonas anómalas, se puede diseñar un mejor plan de perforación y muestreo en cuanto a :

- * Localización de perforaciones y pozos de monitoreo para que proporcionen muestras representativas de las condiciones del sitio.
- * Minimización del número de muestras, perforaciones, y/o pozos de monitoreo requeridos para caracterizar correctamente un sitio;
- * Reducción de los costos y del tiempo de investigación en campo y,
- * Significante mejora en la exactitud de la investigación global.

5.3.1 REGISTROS CONTINUOS Y REGISTROS PUNTUALES

Los registros geofísicos frecuentemente incluyen la elaboración de mediciones de las propiedades del subsuelo en puntos discretos sobre el sitio. Esto es, la instrumentación es puesta en una estación a lo largo de la línea de registro, y las mediciones son hechas en un punto para un tiempo. Sin embargo, algunas técnicas pueden dar mediciones de los parámetros del subsuelo continuamente como la instrumentación sea movida a lo largo de una línea de registro.

El método continuo debe ser empleado siempre que sea posible para minimizar la posibilidad de caer en errores y para alcanzar la máxima resolución así como para minimizar los costos de proyecto. Esto es particularmente importante cuando se sospecha que las condiciones del sitio son altamente variables, y se requiere un intervalo de muestra pequeño.

5.3.2 TIPOS DE REGISTROS GEOFÍSICOS

Existen tres diferentes formas en las cuales la geofísica puede ser aplicada: por transmisión aérea, por superficie, y subterránea. Los métodos de transmisión aérea son usualmente empleados para obtener un panorama regional, o un gran marco de las condiciones del sitio. Los métodos de superficie darán un medio de rápido reconocimiento de una gran área o un medio de obtención de detalles específicos locales. Los métodos subterráneos se pueden usar para dar los detalles muy localizados en el subsuelo o en los pozos (Fig. 5.1).

En ciertas ocasiones la cobertura total del sitio es técnicamente y económicamente factible. Sin embargo, una limitación inherente de todos los métodos geofísicos es que su resolución decrece con la profundidad.

Todas estas técnicas -registros geofísicos de transmisión aérea, de superficie y subterráneas-, tienen un lugar en las investigaciones del subsuelo. A través de combinaciones apropiadas de mediciones geofísicas y datos de pozos, se puede generar un exacto marco tridimensional de las condiciones del subsuelo, cuyo conocimiento se puede entonces usar para desarrollar un modelo conceptual preciso, el cual se incorporará a un gran marco a través de detalles locales.

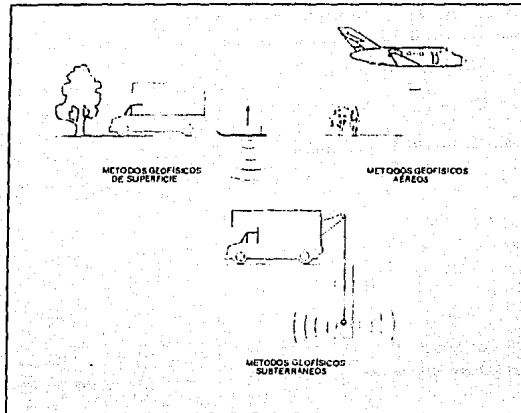


FIGURA 5.1 TIPOS DE REGISTROS GEOFÍSICOS

5.3.2.1 MÉTODO GEOFÍSICOS DE TRANSMISIÓN POR AIRE Y DE PERCEPCIÓN REMOTA

Los métodos geofísicos de percepción remota y de transmisión por aire cubren un amplio rango de espectros electromagnéticos, desde el método electromagnético (EM) de transmisión por aire de más baja frecuencia hasta los registros de radiación de rayos gamma de longitud de onda muy corta por el método radiométrico. El término de transmisión por aire y de percepción remota incluye mediciones hechas tanto de aviones como de satélites.

MÉTODOS DE IMAGEN

Estos métodos son aquellos que dan una imagen de la superficie: Se pueden obtener un amplio rango de fotos aéreas, desde aquellas tomadas con una cámara de mano de 35 mm, a aquellas obtenidas por sensores de satélite complejos. Las fotografías aéreas son una fuente de información geológica y dan una gran panorámica de las condiciones locales.

Si existen fotos aéreas de años pasados, pueden constituir un registro histórico de los condiciones locales. La interpretación de fotos aéreas puede dar información del tipo de yacimientos, estratificación análisis de fracturas o lineamientos, textura del suelo, condiciones de drenaje locales, susceptibilidad de inundación y pendiente de la superficie terrestre.

Además del formato fotográfico estándar (blanco y negro), hay un gran número de opciones disponibles que incluyen fotografías de gran altitud, fotografías a color, infrarojo color-falso infrarojo térmico, radar aéreo de antenas laterales y un amplio rango de imágenes de satélite. Cada una de estas puede ser muy útil para aplicaciones específicas: sin embargo, las fotografías de formato blanco y negro son las más comúnmente usadas en la mayoría de las caracterizaciones locales. Son también bajas en costo y fácilmente disponibles.

MÉTODOS SIN IMÁGENES

Los métodos sin imágenes dan medidas de algunos parámetros a lo largo de la línea de vuelo del avión. Estos métodos incluyen mediciones electromagnéticas (usando frecuencias

sobre unos pocos Kilohertz (KHz), mediciones magnéticas, mediciones radiométricas de radiación gamma y radar de penetración subterránea usando frecuencias de alrededor de 100 megahertz (MHz). Son referidos como métodos sin imágenes debido a que a medida que el avión se va moviendo a lo largo de una línea de registro, son obtenidas una serie de mediciones antes que una imagen. Mientras los métodos de imagen dan solo una medición de las condiciones de la superficie, estos miden las condiciones del subsuelo. Estos métodos son normalmente aplicados a áreas grandes o que no son de fácil acceso por tierra.

El *método electromagnético* mide la conductividad eléctrica de los materiales del subsuelo; proporciona una medida de los cambios geológicos globales, hidrológicos y condiciones ambientales, basada en la conductividad eléctrica.

Los *registros magnéticos* dan un medio de determinación de la susceptibilidad magnética del suelo y roca y por lo tanto pueden proporcionar un mapa geológico. El mapa resultante da un panorama global de las condiciones geológicas basado en las propiedades magnéticas y puede identificar grandes condiciones anómalas.

Los *registros radiométricos* dan un medio para medir la radiactividad natural (potasio-40 y productos derivados de las series de desintegración del uranio y torio), que son emitidos por todas las rocas.

El *radar de penetración subterránea*, el cual es comúnmente usado en la superficie, ha sido usado para aplicaciones aéreas limitadas (este método se describe en la sección de métodos geofísicos de superficie). En general, donde la penetración del radar es buena y el sitio esta libre de vegetación y construcciones, el método puede ser utilizado para obtener perfiles a poca profundidad en esos materiales.

5.3.2.2 MÉTODOS GEOFÍSICOS DE SUPERFICIE

Entre los métodos geofísicos de superficie los principales son:

- * Radar de penetración subterránea
- * Electromagnéticos
- * Resistividad
- * Refracción sísmica
- * Reflexión sísmica
- * Microgravedad
- * Detección de metales
- * Magnéticos

Estas técnicas son las más usadas regularmente y tiene efectividad probada para la determinación local de desechos peligrosos. Se presenta a continuación una breve descripción de cada una de estas técnicas geofísicas de superficie.

RADAR DE PENETRACIÓN SUBTERRÁNEA

El radar de penetración subterránea usa ondas electromagnéticas de alta frecuencia desde menos de 100 MHz a 1000 MHz para adquirir información del subsuelo. La energía es radiada hacia abajo en el suelo desde un transmisor y es reflejada a una antena de recepción. Las señales reflejadas son registradas y producen un registro continuo de la sección transversal o perfil de las condiciones del subsuelo a poca profundidad.

Las reflexiones de las ondas de radar ocurren siempre que haya un cambio en la constante dieléctrica o conductividad eléctrica entre los dos materiales. Los cambios en la conductividad y en las propiedades dieléctricas están asociados con las condiciones

hidrogeológicas naturales tales como lechos, cementación, humedad, contenido de arcilla, vacíos y fracturas. Por lo tanto, una interfase entre dos capas de suelo o roca que tienen un contraste suficiente en las propiedades eléctricas se muestra en el perfil del radar. El nivel del agua puede ser detectado en materiales de grano grueso pero no en sedimentos de grano fino con una grande franja capilar. Ambas, tuberías metálicas y no metálicas o depósitos, se pueden también detectar.

La escala vertical del perfil del radar esta en unidades de tiempo (nanosegundos, 10^{-9} s). El tiempo tomado por una onda electromagnética para moverse hacia el reflector y regresar a la superficie es relativamente corto debido a que las ondas viajan aproximadamente a la velocidad de la luz. La escala de tiempo entonces se convierte en la profundidad haciendo algunas suposiciones acerca de la velocidad de las ondas y los materiales del subsuelo.

La penetración de profundidad de la onda del radar es altamente especifica del sitio. El método esta limitado en la profundidad por la atenuación debido a la alta conductividad eléctrica de los materiales del subsuelo o dispersión. Se han llegado a reportar penetraciones en el suelo o roca de más de 100 pies, sin embargo, la penetración de 15 a 30 pies es más típica. En aluviones y arcillas, la penetración puede ser limitada a unos pocos pies o menos.

El radar tiene la más alta resolución de todos los métodos geofísicos de superficie. La resolución vertical de los datos del radar pueden variar de menos de una pulgada a varios pies, dependiendo de la profundidad y de la frecuencia usada. Se puede seleccionar una variedad de antenas para cubrir frecuencias desde menos de 100 MHz a 1000 MHz. Las más bajas frecuencias proporcionan profundidades más grandes de penetración con menor resolución y las más altas frecuencias dan menos profundidad de penetración con más alta resolución.

ELECTROMAGNÉTICOS

Existen dos principales tipos de instrumentación electromagnética: la más común es el sistema de dominio frecuencial en el cual el transmisor esta radiando energía todo el tiempo y el cual mide cambios en la magnitud de la corriente inducida dentro del subsuelo, y; el sistema de dominio temporal, que consta de un transmisor enciclado; las medidas cambian en la corriente inducida dentro del subsuelo como una función del tiempo. Los sistemas de dominio de frecuencia y de dominio de tiempo inducen corriente al subsuelo por inducción electromagnética.

Debido a que los instrumentos electromagnéticos no requieren contacto eléctrico con el subsuelo, las mediciones pueden ser hechas bastante rápidamente. Las variaciones laterales en la conductividad pueden ser detectadas y proyectadas para su perfilación.

RESISTIVIDAD

Al igual que los registros electromagnéticos, los de resistividad eléctrica son una función del tipo de suelo o roca, su porosidad, y la conductividad de los fluidos que llenan los espacios de poro. El método se puede usar en muchas de las mismas aplicaciones que el método electromagnético.

El método de resistividad consiste en el paso de una corriente eléctrica a través del suelo por un par de electrodos en la superficie. Como fuente de poder se usa una corriente directa y un interruptor de corriente directa. El voltaje resultante es medido en la superficie entre un segundo par de electrodos. Mientras más grande sea el espaciamiento entre electrodos es más grande la profundidad de las mediciones. Usualmente la profundidad es

menor que el espaciamento entre electrodos. Hay una gran variedad de geometrías de electrodos que se pueden usar, incluyendo la Wenner, Schlumberger, dipolar y muchas más. La resistividad del suelo y de la roca es calculada en base con la separación de electrodos, la geometría del arreglo de electrodos, la corriente aplicada y el voltaje medido.

Un inconveniente del sondeo de resistividad es que los arreglos requieren espacio considerable. Por ejemplo, un arreglo Wenner para sondeo (con cuatro electrodos igualmente espaciados) puede requerir que el espaciamento entre los electrodos sea tan grande como tres o cuatro veces la profundidad de interés. Por lo tanto, un sondeo a una profundidad de 100 pies podría requerir una longitud de arreglo total (desde corriente de electrodo a corriente de electrodo) de 900 a 1200 pies. En muchos sitios este espacio no es disponible.

REFRACCIÓN SÍSMICA

El método de la refracción sísmica es comúnmente aplicado a investigaciones a poca profundidad, alrededor de unos cientos de pies. Una línea de refracción sísmica para una investigación a poca profundidad puede consistir de un arreglo de 12 o 24 geófonos a igual espaciamento distanciados de 5 a 10 pies. Se crean dos impulsos sísmicos en el final de cada arreglo de geófonos y se registran sus ondas refractadas separadamente. El registro de refracción puede requerir una máxima distancia de la fuente al geófono de tres a cuatro veces la profundidad de investigación.

Se requiere un incremento significativo de energía conforme se incrementa la profundidad de investigación.

El trabajo de refracción sísmica se puede realizar de muy diferentes formas, la más simple es creando dos impulsos sísmicos separados, uno en el final de cada arreglo de geófonos. El resultado de esta simple medida da dos profundidades y así la depresión de la roca bajo el arreglo de geófonos.

Se puede realizar un registro de refracción más detallado para que las profundidades se obtengan debajo de cada geófono. La resolución lateral dependerá del espaciamento entre geófonos, el cual puede variar de 5 a 50 pies.

REFLEXIÓN SÍSMICA

El registro de reflexión sísmica es capaz de investigaciones a mucha más profundidad y con menos energía que el método de refracción. La técnica de reflexión se puede usar con éxito para profundidades de unos miles de pies y puede dar secciones geológicas relativamente detalladas.

Los métodos de reflexión para poca profundidad, de alta resolución, intentan utilizar las más altas frecuencias posibles (150 a 600 Hz) para mejorar la resolución vertical; el espaciamento de los geófonos, relativamente estrecho (separados de 1 a 20 pies) proporcionan buena resolución lateral. Debido a la necesidad de frecuencias más altas, es importante la selección adecuada de la fuente sísmica y su óptimo acoplamiento al suelo o roca, así como la ubicación de los geófonos.

La limitación más común serán los ruidos acústicos causados por fuentes naturales o inducidos.

MICROGRAVEDAD

Los instrumentos de gravedad responden a cambios en el campo gravitacional de la tierra causados por cambios en la densidad del suelo o roca. Hay dos tipos básicos de registros de gravedad: un registro de gravedad regional y un registro de micro gravedad local. Un registro de gravedad regional emplea estaciones ampliamente espaciadas (unos miles de pies a unas pocas millas) y es llevado a cabo con una medida de gravedad estándar. Los registros de micro gravedad, por otra parte, tienen espaciamiento de estaciones generalmente de 5 a 20 pies y son realizados con microgravímetro muy sensible. Esos registros son usados para detecciones y proyecciones poco profundas, anomalías geológicas muy locales, tales como conductos en las rocas, fracturas y cavidades.

Un gravímetro está diseñado para medir diferencias extremadamente pequeñas en el campo gravitacional, es un instrumento muy delicado controlado termostáticamente para minimizar las desviaciones causadas por las variaciones de temperatura.

DETECCIÓN DE METALES

El detector de metales es usado comúnmente para el registro o localización de tuberías enterradas, cables, y accesorios de metal. Pueden también ser usado para la detección de tanques enterrados y para delinear las fronteras de trincheras que contienen depósitos metálicos o desperdicios. Estos instrumentos pueden detectar metales ferrosos tales como hierro y acero y metales no ferrosos tales como aluminio y cobre.

Los detectores de metales tienen un rango de detección relativamente corto debido a que su respuesta es proporcional a la sección transversal del objetivo e inversamente proporcional a la distancia del objetivo a la sonda. El área de detección del instrumento es aproximadamente igual a su tamaño de bobina o su distancia entre las bobinas de un cable pupinizado (típicamente de 1 a 3 pies). Los detectores de metales pueden ser afectados por tuberías metálicas cercanas, cercas, carros, construcciones y en algunos casos cambios en las condiciones del suelo.

MAGNETÓMETROS

Un magnetómetro mide la intensidad del campo magnético de la tierra. Este tipo de registro es útil para la proyección de las condiciones geológicas regionales, proyectar profundidades de yacimientos, cavidades y fracturas. Un magnetómetro solo responderá a metales ferrosos (hierro y acero) y no detectará metales no ferrosos. La presencia de metales ferrosos enterrados crea una variación local en la fuerza del campo magnético de la tierra permitiendo la detección y proyección de metales ferrosos enterrados.

5.3.2.3 MÉTODOS GEOFÍSICOS SUBTERRÁNEOS

Existe una gran variedad de técnicas de registros subterráneos para la determinación de las características del suelo, roca o fluidos a lo largo de la perforación o el pozo de monitoreo. Estos métodos dan mediciones continuas *in situ* de alta resolución que frecuentemente son más representativas de las condiciones hidrogeológicas que las muestras obtenidas de una perforación. Las técnicas de registro requieren de una adecuada determinación de las condiciones del subsuelo debido a que frecuentemente se necesita que se usen registros múltiples ya que cada registro responde a una diferente propiedad del suelo,

roca o fluido.

Las mediciones de los registros de perforación se pueden recolectar para conocer los estratos geológicos en el pozo y entonces se pueden usar para identificar estratos geológicos en otros pozos sin muestreo. Se pueden obtener en el registro las capas delgadas y sutiles no detectadas tan fácilmente en el registro de perforación.

Se puede medir *in situ* una gran cantidad de propiedades de suelo y roca. Se pueden obtener los valores para la porosidad del suelo y roca, densidad, velocidad sísmica, y módulo elástico para facilitar los diseños de ingeniería. Aún más importante es la habilidad para identificar la uniformidad o falta de uniformidad de las condiciones del subsuelo. Las mediciones en las perforaciones se pueden usar para identificar zonas permeables, tales como lentes de arena, zonas húmedas, y fracturas o cavidades por solución en la roca. Esas mismas mediciones también son efectivas para identificar zonas impermeables, tales como acuitardos, y determinar su continuidad e integridad.

Cada registro es susceptible a ruidos o alteraciones naturales e inducidas, pero el diámetro de la perforación será probablemente lo más importante. La mayoría de los registros dan mediciones dentro de un radio de 6 a 12 pulgadas del pozo. Por lo tanto, a medida que el diámetro del pozo sea más grande, las mediciones serán dominadas por los aspectos de perforación y construcción del pozo.

REGISTROS NUCLEARES

REGISTRO DE RADIACIÓN NATURAL DE RAYOS GAMMA

El registro mediante rayos gamma es un procedimiento geofísico de sondeo basado en la medición de la radiación natural de rayos gamma, proveniente de los elementos radiactivos que tienen lugar en cantidades variables, en las formaciones subsuperficiales. El registro es un diagrama que muestra la emisión relativa de rayos gamma, medida en impulsos por segundo, y en función de la profundidad por debajo de la superficie. La curva que así se obtiene es similar en apariencia a la curva de resistividad de un registro eléctrico corriente.

Los cambios de radiación están por lo general asociados a diferencias existentes entre los tipos de materiales que componen los sucesivos estratos [48].

El instrumental para registro de rayos gamma es parecido al que se usa para registros eléctricos, exceptuando la sonda que se usa para el pozo y el mecanismo detector.

Los registros de rayos gamma se pueden obtener ya sea que el pozo se encuentre o no, adornado con tubería de acero. El metal del tubo absorbe una parte de la radiación, pero este tipo de registro puede usarse en ciertos casos en que la presencia del adorno desvirtúa el registro eléctrico. El radio de investigación de éste registro abarca de 6 a 12 pulgadas desde las paredes del pozo.

REGISTRO DE RADIACIÓN GAMMA-GAMMA (DENSIDAD)

Un registro de radiación gamma-gamma se usa para determinar la densidad relativa global del suelo o roca e identificar la litología. El registro puede ser usado en perforaciones adornadas o no y arriba o abajo del nivel del agua [49].

El registro de radiación gamma-gamma es una sonda activa que contiene una fuente de radiación y un detector. La respuesta de este registro, es un promedio sobre la distancia entre la fuente y el detector. El radio de acción de un registro de radiación gamma-gamma es relativamente pequeño (solo alrededor de 6 pulgadas).

REGISTRO DE RADIACIÓN NEUTRÓN-NEUTRÓN

Un registro de radiación neutrón-neutrón da una medida del contenido de humedad relativa sobre el nivel del agua y la porosidad abajo del nivel del agua. Es de las mismas características que un registro de radiación gamma-gamma. Las variaciones en el diámetro de la perforación y los factores de construcción del pozo pueden afectar este registro, pero no tan severamente como al registro de densidad (radiación gamma-gamma).

REGISTROS NO NUCLEARES

REGISTRO DE INDUCCIÓN

Este registro es un método de inducción electromagnética para medir la conductividad eléctrica del suelo o roca en perforaciones además o no con PVC arriba o abajo del nivel del agua (similar a las mediciones electromagnéticas hechas en la superficie). Un registro de inducción proporciona datos similares a los obtenidos por un registro de resistividad (debido a que la conductividad es el recíproco de la resistividad). Sin embargo, el registro de inducción se puede correr sin contacto eléctrico con la formación, por lo tanto, puede ser usado en la zona no saturada y en la zona saturada y puede correrse a través de la tubería de revestimiento de PVC.

El radio de investigación para el registro de inducción es aproximadamente de 2.5 pies desde el centro del pozo.

REGISTRO DE RESISTIVIDAD

Este registro mide la resistividad aparente (en ohm/ft u ohm/m) de la roca y suelo en la perforación. El registro de resistividad mide las mismas propiedades y rasgos que el registro de inducción. Sin embargo, debido a su necesidad de contacto eléctrico con las paredes de el pozo, el registro de resistividad solo puede correrse en una perforación sin ademe, llena de agua o fluido de perforación.

Existe una gran variedad de geometrías o espaciamiento entre electrodos que se pueden usar para un registro de resistividad. El más común es el registro "normal". La sonda de registro de resistividad normal *corta* (con espaciamiento de electrodos generalmente de 16 a 18 pulgadas) proporciona buena resolución vertical y mide la resistividad aparente de la formación inmediatamente alrededor de la perforación. La sonda de registro normal (con espaciamiento de electrodos usualmente de 64 pulgadas) tienen menos resolución vertical pero miden la resistividad aparente de la roca imperturbada en un gran radio desde el pozo, similar al registro de inducción.

REGISTRO DE RESISTENCIA

Este tipo de registro mide la resistencia (en ohms) de los materiales de la tierra ubicados entre un electrodo en la perforación y un electrodo en la superficie. Solo puede correrse en perforaciones sin ademe, en la zona saturada. El registro de resistencia no se debe de confundir con el registro de resistividad que da una medida cuantitativa de la resistividad del material.

El radio de investigación del registro de resistencia es bastante pequeño. En muchos casos es fuertemente afectado por la conductividad del fluido de pozo y por la resistencia del

volumen de roca circundante.

REGISTRO DE POTENCIAL ESPONTÁNEO

El registro de potencial espontáneo mide el potencial natural (en milivolts) desarrollado entre el fluido del pozo y los materiales de roca circundantes. Solo puede correrse en pozos sin ademe, en la zona saturada. El voltaje de potencial espontáneo consiste de dos componentes. El primer componente resulta de el potencial electroquímico causado por la diferencia entre minerales. El segundo componente es el potencial de flujo causado por el movimiento de agua a través de medio permeable.

Las mediciones del registro de potencial espontáneo están sujetas a alteraciones considerables de los electrodos, condiciones hidrogeológicas, y fluido del pozo. El radio de investigación de el registro de potencial espontáneo es altamente variable.

REGISTRO DE TEMPERATURA

El registro de temperatura es una medición continua de la temperatura del fluido del pozo inmediatamente circundante, mediante un sensor dentro de un pozo abierto. El registro de temperatura frecuentemente indicará una zona de flujo de agua subterránea dentro de la porción ademada del pozo. Se indica el flujo cuando la temperatura del agua se incrementa o decrece. Los cambios en la temperatura también pueden ser usados para monitorear fugas en la tubería de revestimiento donde han ocurrido derrames o corrosión. Un registro de temperatura puede tener una sensibilidad de 0.5°C o mejor.

OTROS REGISTROS

Además de todos estos registros mencionados, también son de utilidad en algunos casos los *registros de flujo de fluidos* que consiste en la medición del flujo (usualmente en unidades de longitud por tiempo o volumen por tiempo).

El *registro de conductividad del fluido* es una medición de la conductancia específica del fluido del pozo (en micromhos/cm).

El *registro calibrador* da la medición del diámetro de una perforación abierta o del diámetro interior del pozo ademado. La sonda calibradora consiste de brazos con muelle antagonista que se extienden de la herramienta de registro para que sigan los lados de la perforación o ademado. Los registros calibradores son utilizados para medir diámetros, y para localizar fracturas y cavidades en un pozo abierto. El registro calibrador se puede usar para determinar los detalles de construcción del pozo. Se puede también usar para revelar daños debidos a la corrosión extrema o acumulación de minerales en el interior del pozo ademado.

5.3.3 APLICACIONES DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

No existe una forma exacta para seleccionar el método geofísico requerido para solucionar un problema específico, las tablas y reglas prácticas o empíricas frecuentemente fallan cuando se consideran las necesidades y condiciones de un proyecto específico y sitio específico.

Las aplicaciones de los métodos geofísicos son de gran variedad, pero las que para nuestro estudio importan se podrían resumir en las tres siguientes:

1).- Determinación de las condiciones hidrogeológicas.

- 2).- Detección y proyección de plumas contaminantes
- 3).- Localización y proyección de desechos enterrados y servicios públicos canalizados (agua, alcantarillado, etc.).

5.3.3.1 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS

La primera y frecuentemente más importante tarea de la mayoría de las investigaciones geofísicas locales es la evaluación de las condiciones hidrogeológicas naturales e identificación de cualquier anomalía hidrogeológica. El conocimiento de las anomalías naturales, en relación al marco global, puede asegurar que la perforación y muestreo sean llevados a cabo en los lugares que podrán producir más probablemente información en la ubicación o migración de una pluma contaminante.

El primer paso en cualquier investigación local es obtener la información apropiada del subsuelo (mapas, fotos aéreas, etc.), para que se puedan planeár los registros geofísicos y otros trabajos locales. Las imágenes de fotos son casi una necesidad en cualquier investigación local seria, para auxiliar la planeación de registros geofísicos y ubicar la malla de registros.

Las variaciones en el marco natural poco profundo son mejor evaluadas con radar de penetración subterránea, el cual da la más grande resolución. Sin embargo, la profundidad de penetración de la señal de radar es altamente para sitios específicos, y es típicamente menor de 30 pies. Cuando se presentan arcillas y aluviones en la superficie, la penetración puede ser limitada a solo unos pocos pies.

La reflexión sísmica de alta resolución se puede usar en combinación con el radar para dar un perfil más completo de la profundidad. Este método tiene menos resolución que el radar, pero la información se puede adquirir para profundidades de cientos de pies o más. Estos dos métodos (de reflexión sísmica y el radar) son bastante complementarios para el desarrollo detallado de perfiles geológicos, sin embargo, el costo del registro sísmico es considerablemente más grande que el costo del registro de radar.

La refracción sísmica y sondeos de resistividad proporcionan buena información vertical, aunque no son capaces de lograr la resolución lateral y vertical del radar, o en algunos casos, la resolución vertical de la reflexión sísmica. El dominio frecuencial de las técnicas electromagnéticas tienen muy buena resolución vertical en el modo continuo para profundidades de alrededor de 50 pies, pero son algo carentes en su capacidad para producir detalles verticales.

Probablemente las dos mejores técnicas para mapear las variaciones laterales en el suelo y roca, desde un punto de vista de resolución y velocidad, son el radar y las mediciones electromagnéticas continuas. Mientras el radar se puede usar sólo en sitios específicos, la técnica electromagnética puede ser aplicada en casi cualquier medio ambiente y puede frecuentemente dar información a más profundidad, pero con mucha menos resolución vertical que el radar.

El método de la resistividad también puede ser usado para mediciones de perfil por movimiento, el arreglo de electrodos en incrementos pequeños proporciona los datos en intervalos mas estrechamente espaciados.

Algunas veces un método funcionará y otro fallará bajo las mismas condiciones locales dadas. Por regla, para que un método geológico funcione debe de haber un contraste en los parámetros que son medidos. El mejor método es uno en el cual los parámetros medidos tengan el más grande contraste y sean menos influenciados por las condiciones locales. La decisión final debe ser hecha con base en las condiciones locales específicas.

Una vez que se tienen razonablemente bien definidas las condiciones bidimensionales y tridimensionales, se puede seleccionar la ubicación de las perforaciones de forma que sean representativas de las condiciones normales del subsuelo.

Cuando se combinen registros apropiados, se pueden obtener las mediciones de registros *in situ* continuos en ambas, zona no saturada y saturada para caracterizar las condiciones hidrogeológicas.

Los registros gamma naturales se pueden usar para la caracterización y correlación estratigráfica.

5.3.3.2 DETECCIÓN Y PROYECCIÓN DE PLUMAS CONTAMINANTES

La mejor forma para evaluar la dirección del flujo de agua subterránea y la posible extensión de la pluma contaminante es determinando las características hidrogeológicas del sitio.

La detección "directa" de inorgánicos (o mezcla de orgánicos con inorgánicos) se puede realizar por métodos eléctricos, incluyendo radar de penetración subterránea. La conductancia específica más alta de los fluidos de poro actúa como un trazador por el cual la pluma se puede mapear.

El radar de penetración subterránea puede dar un medio de proyección a lo largo de toda la profundidad y la extensión lateral de plumas de inorgánicos poco profundas donde sea posible una penetración conveniente. Sin embargo, las mediciones electromagnéticas son preferidas para trabajos de perfil, particularmente donde se puede emplear el muestreo continuo. La resistividad es preferida en trabajos de sondeo.

Ambos métodos (de conductividad electromagnética y de resistividad) son capaces de sondeos verticales pero pueden omitir una pluma contaminante si las mediciones no se hacen en el lugar apropiado.

El dominio frecuencial del método electromagnético proporciona una profundidad de penetración limitada alrededor de los 200 pies y da menos resolución que el método de resistividad ya que las medidas son hechas para pequeñas profundidades. La profundidad para la cual los datos de sondeo por resistividad se pueden obtener es virtualmente ilimitada (de unos pocos cientos a miles de pies)

Una vez que la extensión espacial de los contaminantes ha sido proyectada por métodos geofísicos de superficie o después de que las perforaciones han sido instaladas, se puede usar un registro continuo del pozo para evaluar los cambios en la conductividad hidráulica vertical del suelo y roca, así como la distribución de contaminantes. La distribución vertical y concentración de contaminantes en un lugar puede variar significativamente como resultado de cambios locales pequeños en la conductividad hidráulica. Dos técnicas de registro de pozo, particularmente pozos adaptados para evaluaciones de conductividad eléctrica, son el registro de inducción electromagnética (o registro de resistividad solo en un pozo abierto) y el registro de neutrón (porosidad). Ambos registros se pueden llevar a cabo en un pozo abierto o adomado con PVC, arriba o bajo del nivel del agua.

Frecuentemente se requiere que se corra más de un registro para obtener una adecuada determinación de las condiciones, una vez conocidas éstas; se puede diseñar un sistema de pozos de monitoreo confiable y representativo y los datos obtenidos de estos sistemas se pueden evaluar con mayor exactitud.

5.3.3.3 LOCALIZACIÓN Y PROYECCIÓN DE DESECHOS ENTERRADOS Y SERVICIOS PÚBLICOS CANALIZADOS

La localización y proyección de desechos enterrados, tuberías de agua, alcantarillado y tanques, es una aplicación común de los métodos geofísicos. La localización de desechos enterrados donde no esta presente el metal se pueden realizar comúnmente con el radar de penetración subterránea, si las condiciones del suelo lo permiten. Las herramientas electromagnéticas para pequeñas profundidades también son efectivas en la mayoría de los problemas puntuales. Cuando los metales están presentes, la primera elección puede ser el registro de conductividad electromagnética o los detectores de metal y los magnetómetros. Los detectores de metal y los magnetómetros no se afectan por la mayoría de los tipos de suelo o por la presencia de contaminantes. Sin embargo, las mediciones electromagnéticas están influenciadas por variaciones en el suelo y en la presencia de contaminantes.

El detector de metal y el registro electromagnético responderán a metales ferrosos y no ferrosos, mientras que el magnetómetro solo responderá a metales ferrosos. Por lo tanto, es necesario determinar que metales pueden estar presente para seleccionar el método adecuado.

El radar se puede usar para encontrar depósitos o tanques, pero será incapaz de detectar un simple cilindro si no esta orientado para que la energía sea reflejada en la antena. Además muchos objetos, naturales o no, pueden tener una respuesta similar al radar a la de un cilindro.

Para objetivos discretos o pequeños, se requieren las mediciones continuas (en líneas espaciadas estrechamente, alrededor de 5 pies) para asegurar la detección. El radar, equipo electromagnético, detector de metales y ciertos magnetómetros pueden dar esas mediciones continuas. Sin embargo, puede haber casos en los cuales la proximidad de otras estructuras de metal puedan limitar el uso de registros electromagnéticos para localizar cilindros o trincheras, y hacer del radar una buena elección.

Los detectores de metal y el radar proporcionan una resolución espacial razonablemente buena para indicar con toda precisión la localización de un objetivo.

Los detectores de metal, las unidades electromagnéticas y el campo total de los magnetómetros son altamente susceptibles a la interferencia de otros objetos metálicos cercanos. Cualquiera de estos objetos puede producir una respuesta errónea que puede ser interpretada incorrectamente como un objetivo del subsuelo.

Las técnicas sísmicas, de resistividad, magnéticas y de gravedad se pueden usar también para localizar límites de grandes trincheras o rellenos sanitarios. Estas técnicas son mucho más lentas y darán menos resolución que los métodos previamente descritos. Sin embargo, son frecuentemente las únicas técnicas que pueden ser usadas para estimar el espesor del relleno o la trinchera. Se debe de hacer notar que la interpretación de tales datos debe ser hecha con precaución, por personal con experiencia.

5.4 PERFORACIÓN DE POZOS DE EXPLORACIÓN

El método más seguro para conocer las características de las formaciones que yacen por debajo de la superficie del terreno y la calidad de el agua, es el de perforar a través de éstas, obteniendo de este modo muestras geológicas mientras se perfora y llevando un registro litológico del agujero. El registro litológico consiste en anotar las propiedades características

de los estratos, en función de su propiedad [48].

El registro de pozo más común es la descripción que el perforador hace del carácter de cada estrato, su espesor, la profundidad a la cual se observaron los cambios litológicos y la profundidad del agua.

En ciertas condiciones también se pueden obtener tanto un registro eléctrico como otras formas de registros geofísicos.

Las muestras de material subsuperficial que se obtienen durante el proceso de perforación constituyen en la mayor parte de los casos, la mejor fuente de información geológica e hidrológica.

Lo ideal sería que el perforador recogiera muestras representativas a profundidades determinadas y a intervalos tales, que se pudiera mostrar el carácter litológico completo de la formación que se ha penetrado. El método de recuperación de núcleos que se puede emplear cuando se esta perforando dentro de las rocas consolidadas, es el que más se aproxima a esa condición ideal. Le siguen los métodos de embutir núcleos que se aplican cuando se perfora en materiales suaves o no consolidados.

Cuando se perfora con el método de rotación, el recolectar muestras razonablemente representativas requiere de una considerable experiencia y atención. Los registros geofísicos se aplican fácilmente en los agujeros perforados por el método de rotación, pero ello únicamente suplementa la operación de muestreo, sin llegar a sustituirla jamás. De hecho, debe disponerse de algunas muestras que sirven como hitos de verificación, cuando se está interpretando el registro geofísico.

Cuando se trata del estudio de una área, los pozos de investigación se emplazan para verificar o suplementar la información que se haya obtenido por otros cauces. Cuando se está explorando en un lugar determinado, para obtener datos que específicamente se requieren para el diseño de pozos, es necesario darle una atención detallada al muestreo de los materiales acuíferos y la fidelidad de los registros de pozos.

Las ventajas relativas de diversos métodos de perforación investigativa, varían considerablemente. Cada método cuenta con sus ventajas y desventajas, que dependen de las condiciones geológicas locales. Ninguno es superior en todas las situaciones.

Durante el proceso de excavación son tomadas muestras las cuales pueden variar en su tipo dependiendo de los objetivos de la exploración [49].

- * Muestra a granel: No es más que un puñado del material tomado del despojo, optimistamente ella representa la formación entera de la perforación; es la menos exacta de los cuatro tipos básicos de muestras.
- * Muestra representativa: Para los propósitos del monitoreo es una muestra tomada de una profundidad específica la cual contiene todos los constituyentes presentes en la formación en ese intervalo de profundidad.
- * Muestra sin alterar: Son muestras de muy alta calidad tomadas bajo estrictas condiciones minimizando la alteración estructural de la muestra, para evitar en lo posible un cambio en la relación de sus constituyentes.
- * Muestra compuesta: Es una combinación o mezcla de muestras o material colocadas juntas. La mezcla debe de representar la perforación total.

La información del pozo es registrada conforme la perforación avanza y las muestras sean recolectadas.

Entre las varias consideraciones para la instalación de los pozos de un sistema de monitoreo las principales serían [49 y 50]:

- Elección del método de perforación y materiales de construcción adecuados.
- Seguridad en la instalación tanto de los materiales elegidos como del personal ya que los

contaminantes pueden ser, en algunos casos, de manejo peligroso.

-La perforación e instalación, por sí mismos, y la operación inadecuada de los pozos, pueden ocasionar problemas de contaminación en el agua subterránea.

La perforación de pozos de exploración es, como se puede ver, una herramienta complementaria para el análisis de la calidad del agua en el subsuelo: requiere de métodos geofísicos para la correcta ubicación de los pozos y, por otra parte, sería infructuoso sin el programa de monitoreo de agua y suelo adecuado. Los programas de perforación deben de ser diseñados para dar un medio de caracterización exacta de las condiciones del suelo y de la roca en la extensión más grande posible dentro del presupuesto disponible.

5.5 MONITOREO Y ANÁLISIS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El establecimiento de un sistema específico de monitoreo frecuentemente depende de los propósitos de éste. Los objetivos básicos del monitoreo es prevenir, impedir y en su caso, detectar una contaminación actual o potencial del agua subterránea y establecer un continuo registro de la calidad de ésta; se debe de considerar que las circunstancias circundantes del monitoreo necesario pueden variar de un sitio a otro. Se pueden presentar dos tipos básicos de situaciones de monitoreo: monitoreo en pozos ya existentes y monitoreo en nuevas locaciones [50].

Para el establecimiento de un sistema de monitoreo de agua subterránea se requieren varios pasos: *establecimiento de los antecedentes, ubicación y diseño de pozos, programa de muestreo, análisis de laboratorio e interpretación de datos*. Cada uno de estos pasos esta influenciado por el propósito de monitoreo y la información investigación/antecedentes acumulada como requisito de monitoreo.

5.5.1 ESTABLECIMIENTO DE LOS ANTECEDENTES

El establecimiento de los antecedentes se puede describir en cuatro pasos que son: inspección inicial del sitio, investigaciones preliminares, definición del marco hidrogeológico, determinación de la contaminación potencial.

INSPECCIÓN INICIAL DEL SITIO

Su propósito es determinar la extensión de la contaminación del agua subterránea. Debe determinar las prioridades para conducir a un estudio más profundo y el establecimiento de un programa de monitoreo.

INVESTIGACIONES PRELIMINARES

Las investigaciones preliminares incluyen la revisión de los datos existentes acumulados durante la inspección local y de todas las fuentes disponibles. La información necesaria, una vez que la necesidad de un programa de monitoreo ha sido confirmada, incluye registros de precipitación local o del área cercana, mapas geológicos y topográficos y fotografías aéreas del sitio, registros geológicos incluyendo los de pozos existente en o cerca del sitio, e información de otras fuentes de contaminación, su tipo y forma de disposición.

También sería conveniente llevar a cabo un análisis de muestras de agua de cualquier cuerpo acuático del área (agua superficiales, pozos existentes, filtraciones y corrientes), así

como de muestras de posibles contaminantes; realizar algún tipo de inspección de la vegetación del sitio y condiciones de densidad y determinar el uso del agua en el área (consumo, recreación, pesca, etc.).

Mediante los datos obtenidos y su subsecuente análisis e interpretación se deriva otra información importante como: características litológicas, estratigrafía establecida así como clasificación y extensión de unidades hidrogeológicas; características hidrogeológicas clave usadas para el desarrollo del modelo conceptual local como conductividad hidráulica, porosidad, gradiente hidráulico, rendimiento específico y; características del acuífero tales como límites, tipo de acuífero, condiciones de saturación.

Cada pieza de datos es un bloque de construcción importante en el establecimiento del modelo hidrogeológico conceptual y determinación de zonas importantes a ser monitoreadas. Esos datos son usados en combinación para definir las características de el acuífero y del flujo del agua subterránea, para permitir la identificación de las trayectorias de flujo para que las zonas de monitoreo de interés se puedan seleccionar [49].

DEFINICIÓN DEL MARCO HIDROGEOLÓGICO

El determinante más importante del diseño de un sistema de monitoreo es probablemente el conocimiento del marco hidrogeológico. Existen generadores de contaminación que han sido ubicadas en lugares con una alta vulnerabilidad a la contaminación. Por lo tanto, el marco hidrogeológico ayudará a la determinación de la gravedad de la contaminación potencial y a su vez, determinará la necesidad de monitoreo.

El marco hidrogeológico está definido por varios factores [50]:

*Geología superficial y subterránea :Litología, textura, estructura, mineralogía y distribución de los materiales de la tierra consolidados y no consolidados por los que fluye el agua subterránea. Las propiedades hidráulicas de esos materiales dependen del sistema geológico. Así, el sistema geológico del elemento difícilmente influencia el diseño del sistema de monitoreo de agua subterránea [49].

*Información sobre el agua subterránea tal como: nivel freático; proporción natural y dirección del flujo; efectos del contaminante en proporción y dirección del flujo; áreas de recarga y descarga; tipos de interconexiones con acuíferos, si existen; relación de infiltración de contaminante con relación al flujo total; calidad del agua subterránea contaminada y sin contaminar [50].

DETERMINACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POTENCIAL

La complejidad y diseño de un sistema de monitoreo puede ser grandemente influenciada por la amenaza potencial de contaminación. La contaminación potencial es una síntesis de los datos acumulados. Las conclusiones se pueden obtener de [50]:

- Ubicación tamaño y relación del movimiento de la pluma contaminante.
- Acuíferos afectados y acuíferos potencialmente afectados
- Tipos de contaminantes presentes.
- Grado del efecto de atenuación natural por el subsuelo.
- Determinación de la proporción de generación de contaminante

5.5.2 UBICACIÓN Y DISEÑO DE POZOS

La primer tarea en el diseño de un sistema de monitoreo de calidad de agua subterránea es la ubicación y diseño de pozos (49).

Los procesos de selección de la ubicación de los pozos dependen de los estudios hidrogeológicos y registros geofísicos que se hayan efectuado que a su vez están influenciados, como ya se menciono, por los objetivos del estudio. La zona objetivo de monitoreo puede incluir solo una porción de un acuífero muy grueso (por ejemplo hasta casi 100 m) o extenderse varias unidades geológicas.

Con la información acumulada hasta este punto se puede diseñar un sistema de monitoreo. Se puede definir la complejidad y objetivos del sistema y determinar los sitios y profundidades de monitoreo requeridos.

5.5.3 PROGRAMA DE MUESTREO

El objetivo de la mayoría de los programas de monitoreo de la calidad del agua subterránea es obtener muestras que sean representativas de las condiciones del agua subterránea o muestras que mantengan las propiedades físicas y químicas del agua subterránea del acuífero (49).

Una vez que los objetivos del programa de monitoreo del agua subterránea y la ubicación de los pozos hayan sido definidos, el siguiente paso más importante es decidir la frecuencia de muestreo y los parámetros a ser monitoreados. Estos factores son el criterio clave alrededor del cual el programa entero será desarrollado.

Los elementos de diseño de un programa de muestreo son:

- 1.- Objetivos del programa de muestreo y análisis.
- 2.- Parámetros específicos locales de importancia a ser muestreados y analizados.
- 3.- Ubicación, condición y acceso a los puntos de muestreo del programa.
- 4.- Número y frecuencia de muestras a ser recolectadas
- 5.- Protocolo de muestreo:
 - * procedimiento de purga del pozo y necesidades de equipo
 - * monitoreo de parámetros de campo y filtrado de muestra
 - * recolección de muestras, parámetros específicos, técnicas y equipo necesario
 - * control de calidad en campo
- 6.- Requerimientos de pretratamiento en muestras de campo:
 - * filtración
 - * preservación
- 7:- Envío de muestra al laboratorio
 - * manejo de muestra
 - * método de repartición
 - * tiempo de transporte
- 8.- Documentación de muestra, requerimientos de cadena de custodia.
- 9.- Análisis químico de la muestra:
 - * identificación y métodos analíticos
 - * tiempo de ocupación y de almacenaje
 - * control de calidad

5.5.4 ANÁLISIS DE LABORATORIO E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Cualquier método de muestreo debe asegurar muestras no contaminadas para que la interpretación de los datos obtenidos de estas sean correctos. Una vez que la muestra haya sido recolectada y enviada al laboratorio, de éste depende que la interpretación de los datos no sea errónea (49).

La selección de los parámetros analíticos en la investigación del agua subterránea viene dado por el propósito de la investigación, afectada obviamente por las condiciones del sitio, el conocimiento de prácticas pasadas y las leyes y normas que rigen el recurso y su uso.

El análisis del agua subterránea se puede agrupar en dos categorías generales: en la determinación natural del agua subterránea para darle un uso específico y en la determinación de si están presentes contaminantes y su naturaleza.

Para cualquier caso, la lista de los parámetros a analizar no varía considerablemente. Podrá haber elementos o grupos de compuestos que se puedan borrar de la lista dependiendo de resultados de análisis previos y/o su baja probabilidad de detección en el agua subterránea.

En la mayoría de los casos, los parámetros requeridos consisten de una mezcla constituyentes de orgánicos e inorgánicos además de medidas en cuanto a la calidad estética tales como color, turbidez y olor.

La selección del método analítico está determinado por el propósito de la investigación. Actualmente hay varios métodos analíticos para determinar el mismo parámetro. Cada método debe, en el sentido ideal, dar el mismo resultado, sin embargo debido a las variables en cada método, los resultados entre varios métodos pueden variar significativamente. Por esta razón se prefieren algunos métodos, o más aún, se establecen como oficial para la determinación de x parámetro de acuerdo a las normas que rigen la calidad de las aguas subterráneas.

En lo que sea posible, los resultados analíticos y la documentación del laboratorio debe ser independientemente respaldada por un químico calificado y con experiencia en control de calidad.

Desafortunadamente, los procesos de control de calidad no terminan cuando el laboratorio entrega los datos al investigador. A menos que se realice un análisis de datos independiente, para certificar que los resultados sean correctos, se puede asumir que el laboratorio no cometió errores. De no ser así, esto sería una suposición costosa.

Una vez que la validación ha sido determinada y se han tabulado los resultados de los análisis correctamente, sería muy recomendable que personal familiarizado con la hidrogeología del sitio los examine.

El primer avance en la mayoría de las investigaciones de agua subterránea es la determinación de la calidad. Considerando los costos asociados con la instalación del pozo, análisis de laboratorio, etc., se deben tomar todos los pasos necesarios para maximizar los resultados de este esfuerzo y la calidad de los datos recolectados. Esto principia con el diseño de la investigación lo que determina los parámetros a ser analizados, los métodos analíticos a ser usados y el control de calidad del laboratorio a ser seguido.

Como se vio, los datos obtenidos del monitoreo es la culminación de una serie de pasos a seguir para el conocimiento del subsuelo y sus condiciones, que inician con los estudios hidrológicos y el uso de técnicas geofísicas para determinar la mejor ubicación de los pozos de monitoreo.

Los resultados obtenidos de todo este proceso de investigación servirán para la toma de decisiones en las acciones a tomar con respecto al recurso subterráneo.

CAPÍTULO 6

TÉCNICAS PARA EL SANEAMIENTO DE MANTOS ACUÍFEROS CONTAMINADOS

Una vez que han sido determinadas las fuentes de contaminación y su extensión, y tomadas las precauciones de seguridad necesarias, pueden dar inicio las operaciones de limpieza y recuperación del manto subterráneo.

Existen muchos factores que afectan la migración y los requerimientos de saneamiento, por lo que frecuentemente se necesita más de un solo sistema para cada caso. En el descenso de los contaminantes en el subsuelo pueden pasar tres cosas: que el contaminante sea adsorbido por las partículas de suelo; intercepción por una capa impermeable de el suelo y; llegar a un acuífero [51].

Frecuentemente se piensa que el material absorbido no representa ningún riesgo ambiental importante, y se deja en el lugar. La principal excepción ocurre cuando el material derramado es un volátil, como gasolina. Esos compuestos pueden ascender en el suelo y entrar a estructuras a través de los cimientos, produciendo riesgos de explosión o causar olores molestos. En estos casos se debe de hacer algo acerca del material derramado en la zona no saturada. Además, la tendencia posterior debería ser limpiar todo el material del derrame, no sólo el material que llega al acuífero.

El problema reside en que el material adsorbido en las partículas del suelo es muy difícil de encontrar y remover. Además, los componentes del derrame cambian debido a la volatilización y solución en el agua, también pueden transformarse por la biota en el suelo. Las bacterias en el suelo pueden cambiar la estructura de los compuestos orgánicos. Por lo tanto, los orgánicos encontrados en el suelo pueden ser diferentes de los originalmente descargados.

Una vez encontrado, el material se puede remover en varias formas. Para contaminación a poca profundidad se puede excavar el material y usarlo en tierra de cultivo o quemarlo en rellenos sanitarios controlados o darle algún tratamiento de separación del material. Para contaminación en profundidades más grandes, el lavado, recuperación, recarga o los tratamientos *in situ* son los métodos más usados.

El contaminante puede alcanzar el acuífero, y dependiendo de su solubilidad y densidad, el material derramado puede flotar sobre el nivel del agua del acuífero, disolverse en el acuífero o hundirse al fondo de éste.

En la mayoría de los casos de contaminación, el contaminante alcanza el agua subterránea, por filtración o siendo lavado (por el agua de lluvia) a través del suelo. Una vez

que esto ocurre el contaminante se moverá con el flujo del agua subterránea contaminando una gran área.

La elección de los métodos de tratamiento o para la limpieza de orgánicos dependerá de varios factores, entre los más importantes están la descripción del derrame en lo referente a su concentración, cantidad y tipo, su extensión y naturaleza, tiempo total asignado para limpieza y uso final del agua; en lo que respecta a las propiedades del material derramado es importante conocer su solubilidad, densidad, adsorbilidad y degradabilidad.

Además, el criterio a seguir para la elección de él o los métodos de saneamiento radica en parte en que se debe de eliminar el problema causado por el producto, realizar la tarea dentro de un tiempo razonable y que sea económicamente aceptable [52].

Es recomendable que en la recuperación se utilice una combinación de equipo y técnicas que sean específicas para el derrame en particular. Por otra parte, estas operaciones son frecuentemente a largo plazo, envolviendo períodos de años, lo que hay que tomar muy en cuenta.

Antes de iniciarse el programa de recuperación, sería recomendable consultar algunos tratamientos y experiencias en este campo, ya que una incorrecta aplicación del programa puede no solo ser inefectivo, sino empeorar la situación. Otras consideraciones que deben de tomarse en cuenta para el saneamiento son, por ejemplo [53]:

- El producto móvil buscará cualquier ruta de escape como líneas de alcantarillado o agua potable, líneas de drenaje natural etc.
- La fuente del derrame continuará contribuyendo a las condiciones de riesgo y contaminación hasta que sea eliminado.
- Los pozos de prueba deben de instalarse lo suficientemente profundos para determinar el nivel del agua y el del producto.
- Se deben de obtener las aprobaciones necesarias para la disposición del las aguas residuales producidas en el saneamiento.
- El equipo usado debe ser el apropiado para el proyecto de recuperación o se ocasionará un incremento de costos y una pérdida de tiempo.

Si se consideran éstos factores de antemano, se pueden prevenir problemas más tarde o durante las operaciones de saneamiento.

Resumiendo, la operación óptima será la que remueva la mayor cantidad de contaminante con la mínima alteración del nivel del agua a los más bajos costos.

6.1 EXCAVACIÓN Y EXTRACCIÓN

Una medida para la eliminación del problema de contaminación de agua subterránea, es la excavación y extracción del material del subsuelo, el cual es transportado a otra zona en donde recibe el tratamiento necesario para no producir nuevamente contaminación. La zona excavada es rellenada con material arcilloarenoso libre de contaminantes [53].

Una variante del método es la llamada separación por gravedad, que es quizá la más simple de todas las técnicas cuando se trata de tratamiento de suelo. El suelo es excavado y recolectado en grandes depósitos. Los hidrocarburos migran a través de él debido a las fuerzas de gravedad, y son recolectados en los depósitos con un contenedor en la base. Permanecerá el problema de remoción de cantidades residuales de contaminantes atrapados en los espacios de poro del suelo (este método puede fácilmente ser combinado con composteo para separar el resto de los hidrocarburos) [54].

La aplicación de este método se encuentra limitada por la magnitud del área por

excavar, así como por el tipo de construcciones que existan en los alrededores.

El primer paso consiste en cubicar el área afectada. Las zonas donde el volumen por excavar es poco, son más factibles de atacar por este método que las áreas donde la extensión de la mancha contaminante es grande.

Otro factor directamente involucrado en la factibilidad de aplicación de este método es la permeabilidad de los materiales. En sitios con permeabilidad media o alta, el contaminante puede circular rápidamente y abarcar grandes extensiones, lo que llega a hacer inapropiado el método de excavación. Por el contrario, en sitios donde el material que constituye la zona afectada tiene baja permeabilidad, el movimiento del contaminante se reduce y retarda, llegando a presentarse en extensiones limitadas donde si sería factible utilizar este método para su eliminación.

Otra variante de este método sería el uso de trincheras o diques como medio de intercepción del producto contaminante derramado, aunque éste se encuentra limitado a contaminantes del tipo de hidrocarburos o aceites ya que tienden a flotar sobre el agua. Además, solo es práctico cuando el nivel del agua no se encuentra a más de 3 metros de profundidad, aproximadamente. Esta limitación se impone por el equipo para el dragado disponible, la extensión en la cual el terreno soportará las paredes del dique sin derrumbarse, y la cantidad de tierra que debe ser removida. Por ejemplo, los diques en terrenos no consolidados deben tener paredes de pendiente suave provocando que sea removida una cantidad excesiva de tierra, de acuerdo a la profundidad del dique.

La trinchera de intercepción debe ser construida a lo largo de todo el frente de la línea de migración del aceite y debe estar tan cerrada como sea posible (Fig. 6.1), sin perjuicio para

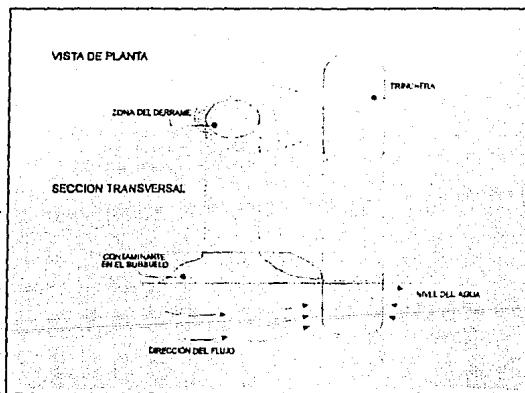


FIGURA 6.1 INTERCEPCIÓN DE UN DERRAME MEDIANTE TRINCHERAS

cualquier construcción en la cual el producto haya penetrado. El dique necesita ser solo lo suficientemente ancho como para acomodar las bombas y los dispositivos de remoción del producto necesarios. La línea impermeable, aunque usualmente innecesaria, puede ser instalada aguas abajo en la pared, para prevenir el flujo progresivo del aceite, pero que permita el paso del agua. En la práctica, la igualación de la presión hidrostática en ambos lados de la pared tiende a hacer que la lámina de aceite flote lejos de ésta. Además, la remoción continua

de agua y aceite de la trinchera hace bajar el agua subterránea en ambos lados, previniendo la migración más lejos. Aún sin la remoción de agua, la continua recuperación de aceite es suficiente para prevenir que el aceite se infiltre mas abajo porque los niveles mas altos de la franja capilar circundante (tierra saturada con agua) actúa como una barrera al aceite.

A menos que el sistema de remoción del producto requiera que la trinchera sea abierta, se coloca una tubería de alcantarilla perforada a lo largo del fondo y entonces se rellena la trinchera con grava o roca. Ésta permanece a lo largo de toda la longitud del dique para la remoción del agua y el aceite.

Hay dos tipos principales de sistemas de recuperación por trinchera. El primero es una trinchera abierta donde se utiliza un desnatador para remover la sustancia. Aunque este sistema produce virtualmente agua libre de aceite, la proporción de recuperación es muy lenta ya que depende del gradiente natural que transporta el aceite a la trinchera. El segundo sistema usa una bomba para remover la sustancia de la trinchera, la cual puede o no tener relleno de soporte. Este sistema es mas efectivo por la rápida recuperación que se da a través de los gradientes creados hacia la trinchera. El inconveniente de este método es que los volúmenes mucho mas grandes de agua pueden contener concentraciones inaceptables de hidrocarburos disueltos [54]. Algunas veces se pueden emplear pozos de inyección para alterar el gradiente hidráulico y así mejorar la recuperación [55].

Existen varias ventajas en el uso de trincheras para recuperación: los materiales y equipos necesarios para instalar el sistema son usualmente disponibles localmente; este método es sencillo y puede ser instalado relativamente rápido. La trinchera, sin embargo, puede bisectar el ancho total del derrame haciendo esta técnica solo factible para derrames de extensión limitada. También, la profundidad de la trinchera esta limitada y cualquier desnatador y equipo de bombeo deben operar continuamente o el producto se acumulara y migrará alrededor de los límites del dique [54].

Antes de que de inicio el saneamiento se debe de recolectar la información del nivel freático del agua y la geología del terreno así como la profundidad de penetración del aceite. Generalmente, el terreno debe ser solo removido para proteger el agua subterránea o cuando la tierra saturada de hidrocarburos presenta riesgos para la salud y se debe de hacer la descontaminación rápidamente. La excavación es frecuentemente evitada por condiciones locales, no obstante, se debe de tener extrema precaución en áreas urbanizadas para evitar perjuicios de tuberías y cables subterráneos, construcciones cercanas, y para no trastornar la estabilidad de las pendientes (p. e. terraplenes de caminos y vías, embalses y canales).

Debido a que los productos volátiles presentan riesgos de explosión y/o pueden producir mezclas sofocantes, se deben de llevar a cabo pruebas de explosión antes de que los trabajos comiencen y mientras están en progreso. Cuando la calidad del aire sea insegura, se deben de usar aparatos de respiración.

Se debe de tener cuidado que esas excavaciones no rompan a través de capas impermeables en el subsuelo (tal como capas de arcilla) ya que esto puede causar que el derrame penetre dentro del subsuelo, más abajo. Además, cualquier excavación debe ser hecha tan pronto como sea posible después de que ha ocurrido el derrame para minimizar la cantidad de suelo que debe ser removido. Obviamente, esto usualmente no es posible con derrames lentos de tanques subterráneos como algunos que pueden estar sin detectarse por años y afectar una amplia área antes de que empiecen las acciones de respuesta. Finalmente, según la ref.[54], se recomienda que la excavación solo sea hecha cuando existen fundamentos o bases obvias de contaminación. La remoción de grandes cantidades de suelo contaminado es costoso, y deben de considerarse primero los métodos de tratamiento *in situ* a menos que existan riesgos para la salud.

6.2 VOLATILIZACIÓN

Este método puede ser de utilidad cuando el contaminante tiende a volatilizarse, como las gasolinas. Aprovechando esta propiedad, el método de eliminación del contaminante consiste en inyectar aire al subsuelo a través de pozos. El aire inyectado es succionado y extraído mediante otro pozo y en su trayecto arrastra compuestos volátiles. Este método llega a ser efectivo y de bajo costo bajo ciertas condiciones de porosidad y permeabilidad [53].

En la Fig. 6.2 se muestra un ejemplo de un sistema utilizado para la ventilación del subsuelo y el arrastre de compuestos volátiles. La preinyección de aire con cierta temperatura incrementa el grado de volatilización. En la figura mencionada, se muestra un calentador de

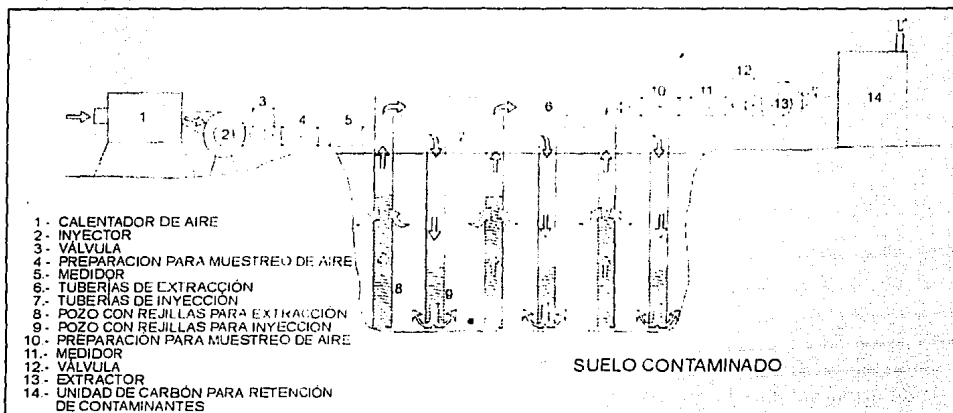


FIGURA 6.2 VENTILACIÓN DEL SUBSUELO Y ARRASTRE DE VOLÁTILES

aire y un ventilador con el cual el aire es inyectado al subsuelo a través de una serie de tuberías y pozos. El aire es extraído mediante otra serie de tuberías y pozos, habiendo arrastrado volátiles a su paso por el subsuelo.

En la Fig. 6.3 se muestra un sistema de aireación para la extracción de volátiles del subsuelo en el cual se incluyen cuatro pozos centrales en los que se inyecta aire y 9 pozos exteriores a través de los cuales se extrae aire y volátiles del subsuelo.

Una variante de este sistema es la llamada ventilación del suelo; frecuentemente los productos volátiles (como la gasolina) permanecen en el subsuelo en forma de vapor y migran a los cimientos de construcciones en el área de derrame [54]. Esto será más grave en sótanos o cobertizos donde los materiales de tierra naturales están aún expuestos dentro de la estructura. El problema puede ser mitigado en algo sellando donde sea posible. Esto no es factible para cimientos de sótanos o cobertizos subterráneos; por lo tanto, se pueden instalar una serie de respiraderos artificiales pasivos para eliminar los vapores, técnica que es especialmente útil durante los meses de invierno cuando las heladas impiden que los vapores escapen de forma natural a través de los sedimentos de la superficie. Se puede también equipar con un ventilador de succión si es necesario.

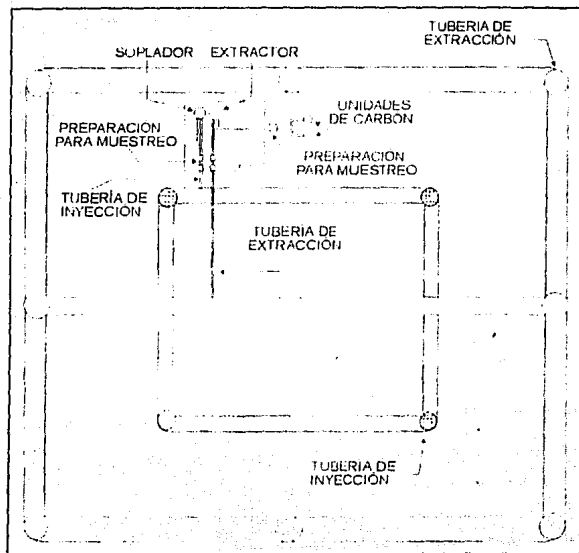


FIGURA 6.3 SISTEMA EXPERIMENTAL DE VOLATILIZACIÓN

Una de las limitaciones del método de ventilación del suelo se presenta por ejemplo cuando el derrame de hidrocarburos contiene baja cantidad de volátiles, ya que se requiere el empleo de vapor o aire caliente [52].

Este sistema se considera factible para suelos de alta a mediana porosidad y permeabilidad. El sistema de extracción de vapores usando pozos ha sido exitoso en suelos con un rango de permeabilidad de 10^{-4} a 10^{-8} cm/s. Se puede requerir un separador de aire-agua para proteger al soplador de agua, en el aire extraído [54].

Después de que el vapor es dispersado a través del aire de los poros del suelo, su suerte puede incluir escapes a la atmósfera, adsorción por las partículas del suelo, destrucción por degradación, o redisolución dentro de la percolación de agua de lluvia.

La dispersión en la atmósfera de los gases venteados puede no ser aceptable y se puede requerir la recuperación de los vapores. La extracción de aire se puede auxiliar mediante un extractor. Ya en la superficie los volátiles pueden ser retenidos mediante un filtro de carbón activado o combustión. Se puede usar un evaporador/condensador como un sistema de recuperación del producto antes de la columna de carbón activado. Hay algunos inconvenientes en el uso de sistemas de carbón tal como riesgo de fuego y saturamiento o taponamiento después de muchas regeneraciones.

6.3 BIODEGRADACIÓN

Mediante este método se activa el crecimiento de los microorganismos existentes en el subsuelo, los cuales con su proceso metabólico degradan a los hidrocarburos. Este método es

acompañado por la adición de oxígeno y nutrientes. Por costo como por aplicabilidad, se ha considerado un método de gran aplicabilidad en la reducción de hidrocarburos en los suelos [53].

La degradación biológica de hidrocarburos implica su descomposición por microorganismos para finalmente producir células microbiales, dióxido de carbono y agua. La biodegradación en el acuífero contaminado depende de varios factores que influyen en el grado de crecimiento de los microorganismos: la disponibilidad de nutrientes, adecuado pH y oxígeno disuelto, salinidad, tipo y concentración de contaminantes, hidrogeología, humedad y temperatura. La biodegradación *in situ* es posible empleando los microorganismos existentes en el suelo, y puede ser aumentado en algunos casos con la adición de nutrientes y microorganismos en el área contaminada. Muchos de los constituyentes orgánicos de la gasolina, dadas las condiciones ambientales, son flexibles a tratamientos biológicos [55].

Los tipos de microbios que atacan a los hidrocarburos incluyen bacterias, hongos, algas y protozoarios; todos se encuentran comúnmente en las superficies del suelo y en el agua. Las bacterias son los principales degradadores. Tienen una gran población y son los microorganismos del suelo más bioquímicamente activos. Su muy pequeño tamaño les permite llegar al subsuelo. Han sido encontradas bacterias aeróbicas en formaciones permeables a profundidades de varios miles de pies, aunque tienen más limitada la actividad en esas profundidades debido a los bajos niveles de oxígeno y nutrientes. Las bacterias anaeróbicas pueden vivir donde se encuentra el oxígeno en compuestos químicos, pero degradan los hidrocarburos muy lentamente comparadas con las de tipo aeróbico [54].

La degradación de los hidrocarburos varía de acuerdo a la composición química.

Los microorganismos requieren del oxígeno debido a que la descomposición del suelo por microbios es esencialmente un proceso de oxidación. El oxígeno se puede proporcionar usando aire, oxígeno puro, peróxido de hidrógeno, u ozono. Además, la rápida degradación del suelo requiere ciertos nutrientes tales como nitrógeno (comúnmente en la forma de nitrato de amoníaco) y fósforo (comúnmente en la forma de fosfatos). Son necesarios otros nutrientes tales como minerales en pequeñas cantidades y se encuentran usualmente en el suelo en medida suficiente.

Por otra parte, las bacterias no pueden crecer en suelos completamente secos ya que requieren el agua para transportar el alimento disuelto (en este caso, los hidrocarburos) dentro de las células bacteriales. Ellas crecen mejor en tierra suelta y húmeda.

La degradación de los hidrocarburos, como ya se menciona ocurre rápidamente bajo condiciones óptimas de aireación, humedad y nutrientes, condiciones que raramente existen en la naturaleza. Estas condiciones pueden ser creadas artificialmente introduciendo aire y nutrientes al subsuelo a través de pozos. Además de proporcionar los nutrientes necesarios, se puede conseguir más rápidamente la degradación cuando los cultivos de bacterias han sido ya aclimatados para la destrucción de hidrocarburos. Existen productos comercialmente disponibles que consisten de cultivos de bacterias. El suelo y el agua ya contienen microbios capaces de consumir hidrocarburos; por lo tanto es adecuado, proporcionar la apropiada nutrición, aireación y humedad para estimular su actividad.

La proporción de degradación es más grande cerca de la superficie en el área contaminada, especialmente si el suelo recibe una adecuada aireación. La proporción es más baja mientras aumenta la profundidad, ya que el suministro de aire y nutrientes decrece. También disminuye esta proporción donde los hidrocarburos se extienden sobre el nivel del agua causando una reducción en el abastecimiento de oxígeno y nutrientes y por consiguiente un notable incremento en la saturación del suelo por hidrocarburos.

En resumen, hay dos categorías de técnicas de restauración biológica por microorganismos *in situ*: La estimulación de la actividad de la población microbiana originaria de

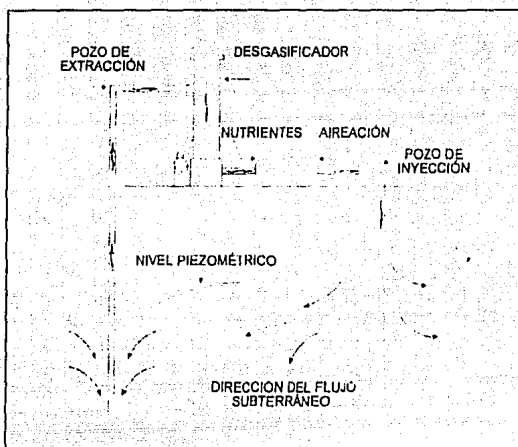


FIGURA 6.4 ESQUEMA DE UN SISTEMA DE BIODEGRADACIÓN APLICANDO NUTRIENTES Y OXIGENO

ese suelo, dentro del acuífero, proporcionando las condiciones óptimas de nutrientes, oxígeno y humedad; y la adición de microbios aclimatados para su crecimiento en contaminante. La biodegradación es mejor usada al tratar cantidades de hidrocarburos en el suelo, cuando no sea ampliamente factible el uso de técnicas de tratamiento de agua subterránea convencionales.

En la Fig. 6.4 se ilustra este método; se muestra un pozo del cual se extrae agua del subsuelo, la cual es llevada a un tanque donde recibe oxígeno y nutrientes, como nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes son transportados por el agua al suelo mediante un pozo de inyección [53].

El composteo es otra técnica de degradación biológica, pero es algo diferente a los métodos previamente discutidos. Con el composteo, el suelo contaminado con materiales orgánicos es excavado y entonces aireado con mezclado y/o aireación forzada para aumentar el crecimiento de las bacterias aeróbicas. Hay cuatro tipos básicos de sistemas de composteo: *sistema cerrado*, *sistema de tendido en bordos para airearse*, *aireación forzada* y *cultivo de tierras*. Todos son métodos de tratamiento a largo plazo, tomando años biodegradar los contaminantes, dependiendo de su concentración en el suelo. Así como en la sección anterior, los organismos pueden ser aquellos ya presentes en los desechos orgánicos u otros introducidos de otras fuentes [54].

Un sistema de composteo *cerrado* incluye digestores o depósitos con agitadores o aireadoras. El material contaminado es simplemente excavado y puesto en los contenedores y aireado. El contaminante también drenará, en alguna proporción, del suelo y se colectará en el fondo de los depósitos. El sistema de *tendido en bordos* es algo similar, excepto que el suelo contaminado es sacado y colocado en pequeños montones formados en hilera sobre

suelo no contaminado. Este método crea alteraciones sustanciales de la superficie del suelo, pero necesita baja inversión de capital y tiene bajos requerimientos de energía. Se le puede agregar fertilizante al suelo para acelerar la descomposición microbial de los hidrocarburos. También es posible esparcir los montones de material; después que el contenido de contaminante haya sido reducido, y drenado el suelo donde se colocó, el material se puede redistribuir sobre el área. Estos procedimientos servirán para eliminar completamente de contaminante las áreas circundantes y fomentar la revegetación. La *aireación forzada* es una variación del tendido de montones en hileras, en ésta se usa un soplador de aire para arrastrar aire desde la base de la masa orgánica a través de tubería perforada. Finalmente, el *cultivo de tierras* incluye el arado del suelo contaminado en la capa superior de tierra usando labranza convencional o equipos de construcción. El suelo es usualmente reesparcido y se fomenta el crecimiento de las plantas. Esta técnica es conveniente para contaminantes que se descomponen rápidamente, no son tóxicos para los microorganismos del suelo, plantas o animales, y no tienen efectos tóxicos a largo plazo que resulten de la absorción o del cambio de iones en el suelo. Además, los contaminantes no deben contener sustancias que puedan afectar adversamente la calidad del agua subterránea o la estructura del suelo, especialmente la infiltración del suelo, percolación y características de aireación.

Aunque el composteo ha sido usado por muchos años para hacer un suplemento del suelo en tierras de agricultura, tiene aceptación limitada para el tratamiento de suelos, debido a su vulnerabilidad con los cambios del agua, requerimientos de labor y reacción lenta. Sin embargo, debido a que necesita pequeña inversión de capital y puede ser usada *in situ*, es una alternativa de tratamiento viable para suelo contaminado con hidrocarburos.

6.4 INCINERACIÓN

La incineración es un método comúnmente usado para la destrucción de desechos orgánicos, consiste en elevar a muy altas temperaturas el agua y los contaminantes en presencia de oxígeno. El suelo saturado con hidrocarburos puede ser limpiado quemando la mezcla en un horno. Esencialmente todos los compuestos orgánicos son oxidados a temperaturas de entre 1500 y 2000 ° F. Cuando el agua contaminada contiene aproximadamente 20% de orgánicos, no se requiere de un combustible para la incineración, en caso contrario, en concentraciones abajo de este nivel, si se requerirá éste. Las concentraciones de orgánicos son raramente tan altas en el agua subterránea debido a que por una parte, una porción de el contaminante será absorbido en la zona no saturada, y luego los compuestos solubles serán diluidos por el agua subterránea. Los compuestos no solubles se quedan fuera del acuífero y son removidos mediante otras técnicas [51].

Otro problema es el alto capital de costo de los incineradores. Esta técnica no es apropiada para grandes derrames debido a que no existen incineradores disponibles comercialmente capaces de manejar grandes volúmenes de suelo. El tratamiento de agua subterránea tendrá que ajustarse a la existencia de un incinerador, si es posible, para la aplicación en pequeños volúmenes de materiales tóxicos [51]. Existen pocos incineradores portátiles disponibles, sin embargo, ya existe un prototipo de horno rotatorio que es capaz de procesar de 0.5 a 2 ton /h de arena con un contenido de 8 a 15% de aceite. este prototipo está basado en un diseño desarrollado por Trecon Ltd. para Environment Canadá y PACE [54].

Los incineradores se pueden combinar con otros tratamientos. Cualquiera de las tecnologías que separan y concentran el contaminante se pueden usar para aplicar factiblemente la incineración. Con el agua separada de los contaminantes se puede alcanzar

una mínima cantidad de combustible auxiliar. Sin embargo, en cuanto a economía se refiere, la incineración será un método de dudosa elección para tratamiento de agua subterránea [51].

Una área en la que se ha estado usando la incineración es en la destrucción de químicos tóxicos en el suelo. Este tratamiento está limitado a casos donde solo las capas superficiales del suelo han sido contaminadas, y en contaminantes que no son solubles en el agua y por lo tanto han permanecido en la superficie donde fueron descargados originalmente. En ambos casos, solo se puede tratar una limitada cantidad de suelo contaminado. La incineración es un proceso caro y solo se debe usar en situaciones únicas. Se puede usar cuando el ingeniero decide que el suelo contaminado de un determinado sitio es demasiado peligroso, o cuando el relleno más cercano está demasiado lejos.

Una variante del método de incineración es la *vitrificación*. Se vitrifica a la arcilla utilizando calor generado por electricidad. Estudios experimentales han demostrado que este proceso es efectivo para hidrocarburos presentes en los suelos. Consiste en convertir al suelo en un vidrio o forma cristalina, fundiéndolo por medio de calor proporcionado por corrientes eléctricas. Es una técnica de reciente creación que ha sido patentada por el departamento de Energía de los Estados Unidos y utilizada principalmente para suelos conteniendo material radiactivo [53].

Se realiza con cuatro electrodos clavados en el suelo, con un arreglo cuadrado, distanciados entre 3.5 y 5.5 metros. Una pequeña cantidad de una mezcla de grafito y vidrio se coloca en forma de x entre los electrodos, en la superficie, con el objeto de proveer un paso conductor. Cuando la resistencia interna del medio conductor causa un incremento en la temperatura, provoca que se funda el suelo adyacente. La materia orgánica tiende a polarizarse creando una zona porosa cerca de la superficie.

Este método quema algunos orgánicos e inmoviliza a otros. El calor provocado llega a alcanzar 1700°C, ya que los suelos generalmente constituidos por sílice y óxidos de aluminio se funden a temperaturas entre 1100 y 1600°C.

6.5 AISLAMIENTO

El método de aislamiento no es precisamente una técnica para saneamiento, más bien es un sistema complementario de éstos. Consiste en aislar la zona contaminada, para lo cual se forman barreras subterráneas alrededor de ésta zona, ayudando con ello a que la extensión del derrame no prosiga y sea menor el área a tratar [53].

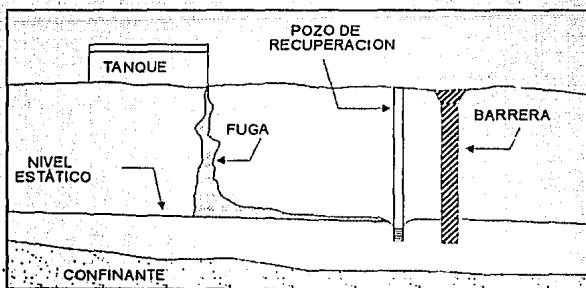


FIGURA 6.5 BARRERA DE AISLAMIENTO DE ZONAS CONTAMINADAS

Estas barreras pueden ser físicas o producto de acciones hidrogeológicas. Las barreras físicas generalmente son construidas con mezcla de cemento, bentonita y arcilla, rellenando "zanjas" o inyectando por medio de pozos, de tal manera que se bloquee o impide el paso del flujo subterráneo y de los hidrocarburos en el subsuelo. Este método se encuentra limitado por la profundidad a la que sea necesaria la excavación o inyección [53].

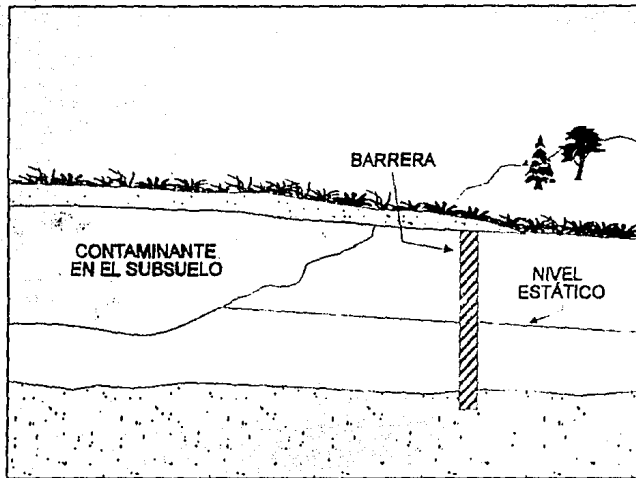


FIGURA 6.6 BARRERA SUBTERRÁNEA PARA IMPEDIR EL FLUJO DEL CONTAMINANTE

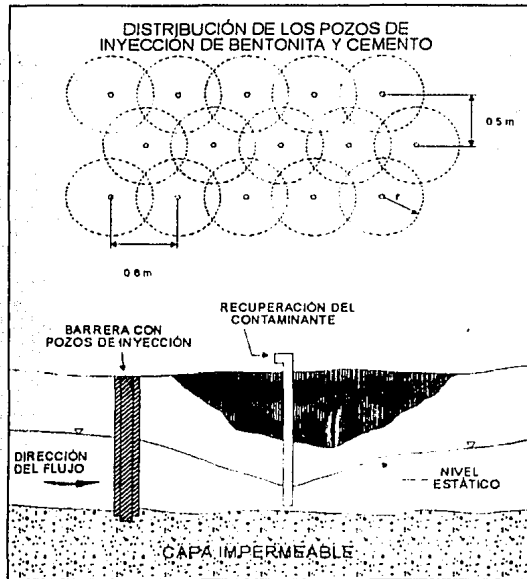
En las Fig. 6.5 y 6.6 se muestra una típica barrera.

Pueden inyectarse al subsuelo mezclas de arcilla con cemento, bentonita o productos químicos como silicato de sodio. La inyección se hace a base de pozos distribuidos a distancias del orden de 0.5 metros y traslapados en la forma como se muestra en la parte alta de la Fig. 6.7.

La cortina impermeable formada por la inyección de productos en el subsuelo, se distribuye tratando de aislar el área hacia donde fluye el contaminante en el subsuelo. En la parte baja de la Fig. 6.7 se muestra el área contaminada y dentro de ella un pozo para recuperar el contaminante.

Otra forma de aislamiento puede provocarse mediante la formación de una barrera de pozos de inyección que impida el paso del circulante. Esta forma presenta variantes, siendo una de ellas el método de Extracción de Agua y Tratamiento.

Este método puede ser usado en las márgenes de ríos para interceptar aceite que de otra forma se infiltraría en la corriente [53].



6.6 EXTRACCIÓN DE AGUA Y TRATAMIENTO

Este es un método usual para la extracción y eliminación de hidrocarburos del subsuelo que tienden a flotar sobre la superficie piezométrica [53].

El agua y la gasolina son bombeados al exterior. Existen dos formas de realizarlo: (1) bombeo agua-gasolina y separación en la superficie; (2) bombeo de agua y gasolina, en forma independiente.

La primer forma consiste en bombear, en un pozo, tanto agua como gasolina, las que en la superficie son separadas. La gasolina puede reutilizarse y el agua se trata para eliminar los residuos de hidrocarburos, pudiendo esto realizarse mediante carbón activado. El agua tratada puede inyectarse al subsuelo para ayudar al flujo del agua y para lavar el medio.

La segunda forma de extraer por bombeo el agua y los hidrocarburos del subsuelo se muestra en la Fig. 6.8. Consiste en una perforación de diámetro amplio o pozo a cielo abierto, construido hasta una profundidad bajo el nivel del agua, de manera tal que permita la colocación de dos bombas, una para la extracción del agua, la que se coloca hasta el fondo del pozo y tiene por objeto abatir el nivel del agua y de esta manera provocar un cono de abatimiento que facilita el flujo de hidrocarburo que flota sobre la superficie piezométrica; el flujo contaminante se dirigirá hacia el pozo donde se formará una capa de gasolinas que es extraída por otra bomba. El agua extraída es pasada a través de una torre desgasificadora.

Una variante del método es la recuperación en "cilindro" que es usada en áreas donde el movimiento del agua subterránea es pequeño o nulo o donde el agua subterránea está

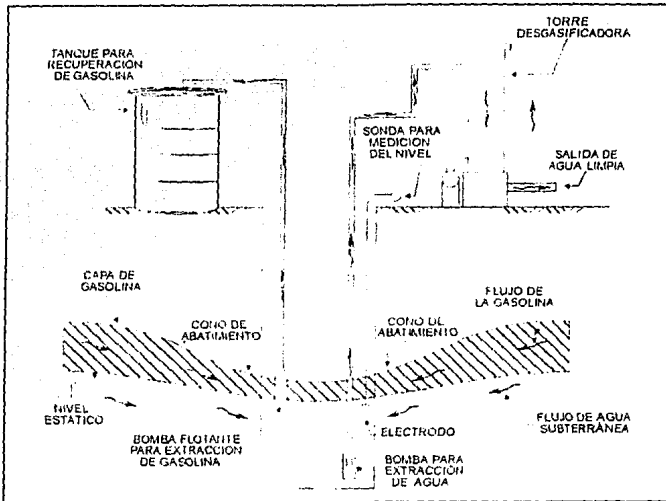


FIGURA 6.8 MÉTODO PARA RECUPERACIÓN DE GASOLINAS

contenida por algunas barreras artificiales y está a menos de cuatro metros de la superficie del suelo. Justo aguas abajo del área de mayor contaminación se lleva a cabo la perforación del pozo colocándose cilindros de concreto de aproximadamente 122 cm de diámetro con agujeros de 6 cm de diámetro repartidos en sus paredes (Fig. 6.9). Se usa entonces el sistema de bombeo antes descrito para extracción del agua y del hidrocarburo separadamente. Este sistema tiene un costo de operación relativamente bajo y puede ser construido con materiales fácilmente disponibles. Sin embargo, el mantenimiento y operación a largo plazo son caros, y es necesario algún tipo de control automático para prevenir que la bomba de el agua extraiga el contaminante [54].

Sería recomendable combinar este método con el de aislamiento mediante el uso de una cortina, como barrera, construida de un material impermeable tal como una mezcla de bentonita-cemento como se menciona antes (Fig 6.10). La barrera desvía el aceite al pozo o al cilindro de recuperación.

Otra modalidad usada como un medio de acelerar la limpieza y disposición del agua tratada es recargando con ésta el acuífero. La recarga también sirve para lavar algo de los hidrocarburos residuales del suelo y puede ser especialmente atractiva para recuperaciones en grandes extensiones. Hay varias ventajas en esta técnica. Debido a que el uso de los pozos de recarga incrementan las pendientes hidráulicas del agua subterránea, el número de pozos de recuperación necesario se puede reducir. Los pozos de recarga causarán la estabilización de los gradientes hidráulicos hacia los pozos de bombeo, aumentando así la proporción de recuperación y reduciendo los costos de operación a largo plazo.

El éxito de esta técnica depende de su apropiado diseño, operación y mantenimiento. Algunas veces es necesario tratar el agua producida antes de recargarla (sistema abierto). Esto lo determinará la calidad del agua producida y el método de recuperación. El tratamiento del agua para remover componentes disueltos antes de recargarla puede ser especialmente costoso, principalmente si existe una gran cantidad de hidrocarburos en el suelo. En el último

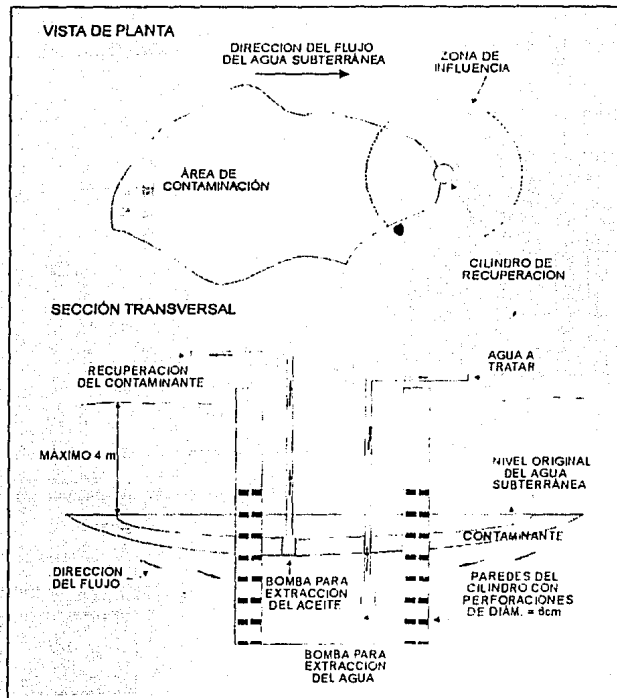


FIGURA 6.9 SISTEMA DE RECUPERACIÓN POR CILINDRO

de los casos, el tratamiento sería particularmente infructuoso (no provechoso) y los hidrocarburos continuarían infiltrándose en el agua subterránea por décadas. Existen varias consideraciones a ser hechas antes de decidir sobre el tratamiento. El agua tratada puede no ser compatible con el agua del acuífero y puede causar reacción y/o precipitación en él. Los problemas para el método de recarga pueden también ocurrir debido a tratamiento de aireación en el agua. Por ejemplo, en agua con altos niveles de hierro, la aireación puede provocar la precipitación en hidróxido de hierro y aumentar el crecimiento de bacterias aeróbicas, lo que puede taponar o parar severamente la recarga del pozo. El sistema de filtros también puede dar un buen medio para el crecimiento de bacterias y debe ser monitoreado, limpiado y desinfectado rutinariamente. Las algas no son usualmente un problema, a menos que el agua producida este aireada y se le deje permanecer en el sol por un período extendido de tiempo. El control de calidad del agua tratada y su interferencia con las propiedades de los hidrocarburos lavados debe ser verificada antes de la recarga.

Según ref. [54], es mayor el costo efectivo simplemente recargando el agua producida del pozo de recuperación directamente al acuífero. El sistema es completamente cerrado y puede ser diseñado para que el agua nunca este expuesta al aire. Es crucial que el sistema este apropiadamente diseñado, especialmente con respecto a la ubicación de los pozos, o se

provocará un incremento en los costos e inhabilidad para contener el derrame. Las dificultades asociadas con los sistemas de recarga directa también incluyen el taponamiento (de partículas suspendidas, burbujas de aire, precipitaciones químicas, emulsificaciones y crecimiento de bacterias), la formación de reacciones y las descargas accidentales de hidrocarburos a través del bombeo de agua. Después se requerirá que sea instalado algún tipo de sistema de alarma que cause que la bomba cierre si se detectan hidrocarburos. Un sistema de recarga cerrado tiene la ventaja de ser barato, y extremadamente flexible; cada pozo de recuperación asociado con los pozos de recarga pueden ser tratados como sistemas de autocontención.

Una alternativa más en este tratamiento es el lavado. La capacidad del suelo de retener aceite depende en algo de su contenido de humedad - un suelo con alto contenido de agua tendrá una baja capacidad de aceptar aceite-. La técnica de lavado trabaja por un mecanismo que incluye deslave de los compuestos solubles. Se deja que grandes cantidades de agua percolen a través del aceite moviendo los hidrocarburos hacia abajo a un embudo de recolección creado en el acuífero. El agua y los contaminantes se pueden entonces recuperar. Este método es similar al de la recarga, con algunas modificaciones.

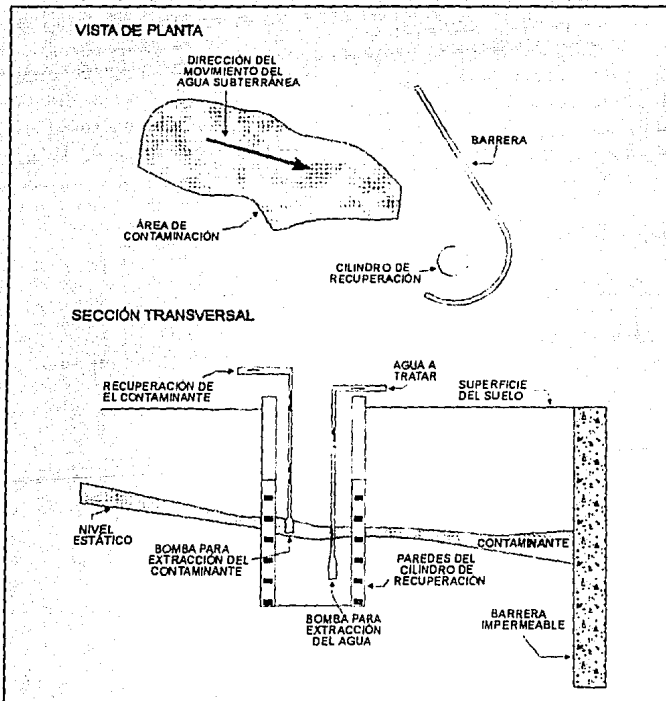


FIGURA 6.10 CILINDRO DE RECUPERACIÓN CON BARRERA DE AISLAMIENTO

Una variación es que el área contaminada puede ser lavada con un detergente acuoso. El detergente tiene una tensión superficial más baja y desplaza al aceite de los poros y capilaridades del subsuelo. Este método no debe ser usado sin la conformidad de las autoridades del agua relevantes porque puede causar nueva contaminación en el agua subterránea con ambos, aceite emulsificado y el mismo detergente.

El uso de agua caliente para recargar la formación incrementa la temperatura del producto, reduce su viscosidad y con ello facilita más que el hidrocarburo sea lavado en los pozos de recuperación. El agua producida de éstos pozos puede ser reusada para la recarga.

6.7 AUTOELIMINACIÓN

Un método que se trata como tal, consiste en la autodepuración del medio permitiendo que en forma natural actúen procesos de biodegradación, volatilización y adsorción en el suelo. La biodegradación se efectúa debido a que todos los suelos constituyen un hábitat natural de microorganismos, muchos de los cuales pueden convertir a parte de hidrocarburos en bióxidos de carbono y agua. Otra parte de los hidrocarburos en el subsuelo son retenidos por adsorción, por las partículas del suelo. Cierta parte de las gasolinas se volatiliza y se puede perder en la atmósfera. El paso de agua a través del medio, puede constituir también una fuente natural del lavado de los suelos. Cuando la permeabilidad de los suelos es reducida y el nivel de saturación somero, se favorece la autodepuración, al impedir la fácil o rápida propagación del contaminante. Las zonas donde se encuentra el nivel piezométrico profundo, presentan mayores problemas para su saneamiento [53].

6.8 EJEMPLOS DE USO DE MÉTODOS DE SANEAMIENTO

En el extranjero se han presentado diversas experiencias de contaminación en las cuales los métodos de saneamiento descritos anteriormente han dado buenos resultados. No se encontraron experiencias nacionales al respecto. Como muestra de que estas alternativas funcionan, se presentan algunos casos:

1.- **FINDLAY, OHIO:** Se detectó agua subterránea conteniendo isopropanol, acetona y tetrahidrofuran. El derrame fue originado de varios tanques enterrados. El autor no menciona de donde proceden los contaminantes.

Para este caso fue usado un sistema de extracción de agua del subsuelo para un tratamiento en la superficie. El efluente del sistema de tratamiento fue reinyectado al subsuelo, creando un sistema o circuito cerrado. La biodegradación de los contaminantes se llevo a cabo en el ambiente subterráneo así como en la superficie en el sistema biológico de tratamiento. El sistema de inyección fue usado para inocular el subsuelo con microbios capaces de biodegradar los contaminantes orgánicos y proporcionar el nitrógeno inorgánico y el fósforo necesarios para apoyar el crecimiento microbial [51].

2.- **CALGARY, ALBERTA:** Serio derrame de productos de petróleo en sedimentos de una planicie de inundación de una planta de asfalto en Calgary, Alberta. Inicialmente se construyó un dique de intercepción a lo largo del límite meridional de la planta y se pensó que el problema estaba resuelto. Sin embargo, en esta etapa anterior no era conocida la extensión

total del problema. Subsecuentemente se descargó aceite en lagunas del Santuario de aves Inglewood. La necesidad de controlar el escape en el santuario de aves requirió una acción de emergencia. Se instaló un drenaje interceptor a través de la zona de derrame. Una alcantarilla en forma de cajón y grava enterrada en la trinchera proporcionaron drenaje lateral del aceite a una serie de sumideros. Después de la migración del aceite, el sistema interceptor fue eliminado añadiendo una barrera impermeable a la pared corriente abajo de la alcantarilla. Las paredes aislantes en ambos finales del sistema interceptor desviaron el aceite dentro del sistema de la alcantarilla de cajón. Esta acción eliminó la fuga de aceite al norte de la laguna. Una investigación detallada del sitio reveló que el aceite se había recolectado en el nivel del agua sobre una área relativamente grande y estaba migrando hacia el santuario de aves siguiendo el gradiente local del nivel del agua. Los contaminantes se dispersaron en una unidad de grava y arena de aproximadamente 10 m de espesor.

Debido al tamaño del derrame, el sistema interceptor no bastó para contener y recuperar todo el aceite. Se instaló un sistema de pozo doble (con doble bomba de extracción) en el santuario de aves. La extracción de agua de los pozos creó el descenso de potencial necesario para mover el aceite dentro de los pozos de recolección del producto. El agua limpia bombeada de los pozos se descargó en los diques interceptores construidos antes en el sitio.

Este sistema de recolección funcionó por 5 años y su desempeño se revisó en 1983. La falta de mantenimiento de los pozos contribuyó a reducir la recuperación del producto. No obstante durante este período de operación aproximadamente 1'300,000l de aceite fueron recolectados. Una cantidad considerable del producto permaneció en el subsuelo especialmente bajo el sitio de la planta y lejos del área de la actividad más intensa de saneamiento. El crecimiento del espesor del producto en el sitio del derrame (la planta) indicó que la fuga del aceite en la fuente continuaba. Basados en el desempeño del sistema en 1983, alrededor de 6 años más se podría requerir recolectar el remanente de producto libre [64].

3.- GLISON ROAD; NASHUA, NEW HAMPSHIRE: Se colocaron desechos de lodos químicos y orgánicos en barriles junto con basura en un pozo de grava y arena. Además, fueron descargados alrededor de 4'000,000l de desechos químicos líquidos al suelo en una trinchera cercana. La mayoría de los contaminantes peligrosos incluían metales pesados y compuestos orgánicos volátiles y extraíbles. La dispersión de los contaminantes fue facilitada por la presencia de una capa permeable de grava y arena de 6 a 35 m de espesor, la cual sobreyacía a tierra y lecho de roca fracturada. Los estudios iniciales en 1980 definieron una pluma de contaminante de más de 450 m de longitud y más de 33 m de espesor. En diciembre de 1980, los contaminantes del frente de la pluma habían empezado a descargarse al arroyo Lyle Reed, localizado en la ribera oeste del área de estudio. Para completar la investigación del sitio en 1981, se llevó a cabo un estudio de factibilidad para establecer la estrategia de acción de saneamiento. Las posibles alternativas incluían confinamiento hidrológico combinado y tratamiento de agua subterránea así como remoción total. La estrategia global que fue adoptada incluyó el aislamiento de las áreas más contaminadas de la pluma usando paredes aislantes y sellos de superficie y un sistema de extracción y tratamiento para remover los contaminantes del agua subterránea. Antes que el remedio pudiera ser implementado en 1982, el monitoreo mostró que una porción de la pluma altamente contaminada estaba alrededor de la descarga en el arroyo. Para retrasar la llegada de este frente fue diseñado un sistema de recirculación de emergencia para remover el agua contaminada de los cuatro pozos en la punta de la pluma y regresarla sin tratamiento usando una trinchera temporal de recarga. Subsecuentes monitoreos indicaron que bombeando los pozos en 0.25 m³/min resultaba ventajoso en el retraso temporal del avance de la pluma.

Los muros aislantes convencionales variaron de 0.5 a 1.25 m de espesor, circundando una área de alrededor de 80,000 m² a una profundidad que variaba de 10 a 33 m. Extensos análisis del desarrollo de las paredes usando varios modelos matemáticos indicó que la cantidad de agua contaminada pasando a través del sitio era reducida de 284 m³/d a 114 m³/d en temporadas con baja lluvia. Aparentemente se está perdiendo la contención, no a través de las paredes pero sí a través de fracturas y zonas de fracturas en el lecho de roca [64].

4.- **MONTGOMERY COUNTY, PENSILVANIA:** Se reporta un caso de biorestauración, donde había sido derramada gasolina de un tanque de almacenamiento subterráneo en una estación de servicio. La pluma contaminante inicialmente contenía arriba de 15 ppm de hidrocarburos disueltos. El sistema de biorestauración utilizado en este sitio consistía de un pozo central de bombeo y una galería de reinyección situada sobre el tanque de almacenamiento subterráneo anterior. El agua subterránea extraída fue pasada a través de una torre de extracción de aire para remover los orgánicos volátiles, y entonces oxigenada y enriquecida con nutrientes antes de ser reinyectada en un proceso en serie. La concentración de hidrocarburos en el agua subterránea fue reducida a 2.5 ppm después de 20 meses de operación del sistema [65].

5.- **CANAL DEL AMOR, NUEVA YORK:** Localizado cerca de las cataratas del Niágara, en Nueva York, el Canal del Amor se excavó en 1890 como auxiliar en la generación de poder de una hidroeléctrica. Antes de empezar la disposición de desechos en el lugar, el Canal del Amor tenía aprox. 3000 pies de longitud, de 40 a 100 pies de ancho y de 8 a 15 pies de profundidad. Hooker compró la propiedad en 1947 y entonces la vendió a Barcos de Instrucción de las Cataratas de Niágara en 1953. Entre 1942 y 1953, Hooker enterró aprox. 22,000 ton de químicos (compuestos orgánicos primarios, incluyendo benzenos clorados, toluenos, lindano y triclorofenol) en el lugar, de acuerdo a las estimaciones de la compañía.

Aunque surgieron periódicamente una variedad de problemas relacionados al relleno, subsiguientes al cierre del lugar alrededor de 1953, no fue hasta mediados los 70 's que el relleno atrajo la atención pública. El fuerte incremento del nivel del agua, debido en parte a las altas precipitaciones, agravó el número de problemas: (1) el hundimiento de la superficie del relleno y la exposición de los barriles, (2) el encharcamiento de agua superficial contaminada en algunos traspatios adyacentes al Canal del Amor, (3) la presencia de olores químicos desagradables, causa de disconformidad y enfermedad según los residentes, (4) la migración de agua subterránea contaminada y líquidos en fase acuosa dentro de los sótanos o construcciones adyacentes al relleno, y (5) la migración de químicos dentro y a través del sistema de drenaje local.

Desde 1977 se han llevado a cabo numerosas investigaciones para determinar la extensión de la contaminación ambiental en el área del Canal del Amor y para definir acciones de saneamiento, las cuales se han conducido en fases. Las correcciones implementadas han incluido sitios de evacuación, demolición de casas y una escuela, instalación de suelo arcilloso y cubiertas sintéticas, construcción de un sistema de drenaje y recolección de lixiviados con una planta de tratamiento de adsorción por carbón, división o segmentación y taponamiento de líneas de servicio y tuberías, construcción de paredes de aislamiento en lugares seleccionados, y la limpieza de las líneas de alcantarillado. Está programado que los trabajos de saneamiento futuros incluyan limpieza de riachuelos y continuar con la operación y mantenimiento del sistema de confinamiento del lugar y programa de monitoreo a largo plazo.

En resumen, las acciones de saneamiento en el Canal del Amor han sido multifacéticas y complejas. Se han llevado a cabo por un gran periodo de tiempo, desde 1978 hasta el

presente. El monitoreo ha continuado a través de todo este proceso, resultando en la mejora del saneamiento, por ejemplo, la cubierta de arcilla fue reemplazada y extendida por una capa sintética. Continuar con el sistema de monitoreo es una parte integral del programa de corrección. Los costos son considerables y ha sido difícil estimarlos [66].

6.- ARSENAL DE LAS MONTAÑAS ROCALLOSAS: El Arsenal de las Montañas Rocallosas (RMA, Rocky Mountain Arsenal) ocupa aproximadamente 17,000 acres en el Condado de Adams, Colorado. El RMA fue establecido en 1942 para manufacturar y procesar productos químicos de guerra. En 1946, fueron arrendadas porciones de RMA a la industria privada para la manufactura de pesticidas y herbicidas. Desde 1943 a 1956 fueron depositados desechos químicos en cuencas no delimitadas.

Aunque han ocurrido problemas de contaminación y saneamiento en varios lugares en RMA, aquí solo se considera el límite norte. A la mitad de los 70's, fueron encontrados contaminantes específicos de RMA como disopropilmetilfosfonato (DIMP) y diciclopentadine (DCPD) en el agua subterránea y en el agua superficial en el límite norte de la RMA. En respuesta a la contaminación observada fuera del lugar, el Departamento de Salud de Colorado cesó concesiones y estableció un programa que incluía el monitoreo del agua subterránea para determinar un medio para interceptar los contaminantes fluyendo a través del límite norte del RMA. Como resultado de un monitoreo continuo, se identificaron contaminantes adicionales, incluyendo Nemagón o dibromocloropropano (DBCP).

El concepto de saneamiento seleccionado incluía la interceptación del agua subterránea a corta distancia al sur del límite norte del RMA, el tratamiento del agua para remover los contaminantes, y la inyección del agua tratada en el límite. En 1977 fue iniciado un sistema piloto de control de contaminación del agua subterránea y completado en 1979, cuyo propósito fue evaluar la factibilidad del concepto de saneamiento seleccionado. El llamado Sistema Piloto en el Límite Norte (SPLN) consistía de seis pozos aluviales de extracción y 12 pozos aluviales de inyección, con 1500 pies de longitud y 3 pies de distancia a la pared de lechada. La pared fue hecha con una mezcla de suelo y arcilla bentonítica anclada en aproximadamente dos pies de lecho de roca. Los pozos de extracción estaban separados aproximadamente 225 pies, fueron colocados en una línea recta paralela al gradiente ascendente de la pared, y eran de aproximadamente 18 pulgadas de diámetro con pozos puestos dentro en perforaciones de 36 pulgadas de diámetro rellenos con grava.

En 1979, el Departamento de Salud de Colorado pidió que la expansión del NBPS interceptara y tratara toda el agua subterránea contaminada con más de $0.2 \mu\text{g/l}$ de los contaminantes antes mencionados. La expansión se inició en 1979 y se completó en enero de 1982. La pared de lechada se extendió 3840 pies al este y 1400 pies al oeste. El número total de columnas de carbón activado se incrementó de 2 a 3. Un nuevo sistema de tratamiento, capaz de tratar 600 gal/min, reemplazó la planta piloto. El número de pozos de extracción aumentó a un total de 54 y el número de los pozos de inyección a un total de 38.

Un problema mayor es la incapacidad del sistema para inyectar el mismo volumen de agua removida de los pozos de extracción. Una razón de esto es que el diseño y número de los pozos de inyección instalados fue marginal con respecto al volumen de agua subterránea extraída. La segunda razón es que la eficiencia de los pozos de inyección se ha reducido debido a los sedimentos suspendidos (pequeñas partículas de carbón las cuales escaparon de los adsorbedores) en el agua inyectada tapando la instalación.

Debido a que no se podría inyectar toda el agua tratada, parte de ésta fue descargada a agua superficial cercana. El sistema fue diseñado tal que la distribución espacial de pozos de inyección balancearía la distribución de los pozos de extracción, minimizando por lo tanto

la cantidad de cambio al campo de preconfinamiento de flujo. Descargando el agua tratada a la superficie, el campo de flujo del agua subterránea es alterado. Además, la descarga en la superficie ha incrementado la proporción del potencial de evaporación, reduciendo por lo tanto el volumen de agua que es finalmente regresada al sistema de agua subterránea.

Los pozos de monitoreo del acuífero aluvial seleccionados para el uso como pozos de detección fuera del lugar han mostrado concentraciones de DIMP y otros contaminantes específicos de RMA. La presencia de DIMP en estos pozos, junto con otros contaminantes del RMA, puede indicar que: (1) la migración de estos contaminantes del RMA continúa ya sea a través, por debajo o alrededor del sistema de confinamiento; (2) la ineficiencia del sistema de confinamiento para interceptar adecuadamente el agua contaminada; (3) el lento escape de DIMP de la superficie mineral (desorción) en el acuífero contaminado; o (4) la contaminación de agua subterránea antes de la construcción del sistema de confinamiento. En resumen, los datos limitados indican algunos problemas con la efectividad de operación del Sistema de Confinamiento del Límite Norte (SCLN) [66].

7.- RELLENO LIPARI: El relleno Lipari es un lugar de 16 acres de relleno inactivo, 6 de los cuales fueron anteriormente usados para la disposición de desechos municipales e industriales. Desde 1958 hasta 1969, fueron vaciados desechos líquidos dentro del relleno y los desechos sólidos fueron depositados hasta mayo de 1971 cuando el lugar fue cerrado por las Autoridades de Desechos Sólidos de New Jersey. Los desechos reportados que han sido depositados incluyen desechos de solventes, tinner, formaldehído, pinturas, fenol y aminos, resinas, etc. El lugar fue cerrado por las autoridades en materia de contaminación de agua superficial como resultado de la migración fuera del lugar de lixiviados.

En agosto de 1982, se seleccionó un método para saneamiento que incluía el confinamiento del relleno usando una pared de lechada de bentonita-suelo y una capa sintética. Las actividades de saneamiento y construcción empezaron el 7 de septiembre de 1983 con la instalación de la pared de lechada de 30 pulgadas de grueso circundando completamente 15.3 acres del lugar. La pared de lechada fue manipulada dentro de una capa subyacente de arcilla que variaba en profundidad de alrededor de 15 hasta 55 pies. La capa no pudo ser completada hasta septiembre y octubre de 1984. La capa sintética completada consiste de 40 milímetros de espesor, polietileno de alta densidad, e incluye un sistema pasivo de ventilación de gases y sistema de drenaje de agua superficial.

Se pretendía en una fase posterior, mejorar la confiabilidad del sistema de confinamiento. El programa de fase II seleccionado, con fecha de 30 de septiembre de 1985, incluye el lavado con chorro de agua repetitivo del total de los 16 acres por al menos un período de 15 años. Como comentario, este nuevo esfuerzo no ha sido aún implementado.

La tendencia del nivel del agua existente dentro del confinamiento sugiere que la cubierta sintética ha sido efectiva. Los niveles del agua tienden a que en el interior no se muestren fluctuaciones que ocurrirían en respuesta a condiciones de recarga.

Debido a que la pared es aparentemente mucho más permeable que la previamente asumida (pruebas de conductividad hidráulica de la pared indicó un valor que es de 4 a 15 veces más grande que el estimado originalmente), el impacto negativo del remedio de la fase II seleccionada durante períodos de niveles de agua altos necesita reevaluación. Un análisis más reciente considera las estimaciones revisadas de la conductividad hidráulica. Este análisis condujo a la conclusión de que se podría requerir un sistema de recolección fuera del lugar sobre la capa de arcilla, si se implementa el remedio de lavado con chorro de agua [66].

CAPITULO 7

EJEMPLO DE APLICACIÓN

7.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estado de Yucatán presenta un ambiente cárstico caracterizado por la presencia de cenotes, cavernas, vegetación caducifolia y como única fuente de agua, un sistema de acuíferos frágiles consistentes de agua dulce flotando sobre agua salina. Las características geohidrológicas de la península de Yucatán, hacen que su acuífero, que es su fuente principal de abastecimiento, sea altamente vulnerable a la contaminación, susceptible de ser alterado fácilmente por las acciones antropogénicas [37].

En la península de Yucatán, la gran permeabilidad del suelo, consistente principalmente de calizas, provoca una rápida infiltración de agua hacia el nivel freático sin dar lugar a la existencia de aguas superficiales, razón por la que los acuíferos son necesariamente fuentes de abastecimiento y receptores de aguas de desechos.

El decaimiento de la industria henequenera dio como resultado la diversificación de las actividades en el medio rural, implatándose entre otros, un programa de desarrollo porcícola que cubre gran parte del estado.

Una característica notable de la ubicación de las granjas porcícolas, es que la mayoría de ellas se encuentran dentro o muy cerca de las poblaciones y en algunos casos las mismas granjas son casas habitación de las familias de los granjeros.

La producción intensiva de cerdos conlleva la generación de grandes cantidades de desechos: 457 kg de peso vivo generan alrededor de 22.7 kg de excreta al día y la cantidad utilizada en las labores de limpieza de corrales se estima en 60 l/animal/día. Estos desechos que contienen una gran cantidad de materia nitrogenada susceptible de convertirse a nitratos, generalmente son depositados sobre el suelo o en cavernas en los alrededores de las granjas, causando una contaminación directa al agua subterránea ya que las condiciones ambientales del estado propician una recarga directa del agua pluvial al acuífero.

Según la ref. [37], mediante un estudio en una región al noreste de la ciudad de Mérida, se detectaron concentraciones de nitratos que sobrepasan a la norma para la calidad del agua potable.

Las concentraciones de nitratos en aguas subterráneas registran variaciones dentro de límites amplios que dependen de las condiciones geoquímicas, los procedimientos de evacuación de desechos humanos y animales y el uso de la tierra. Los resultados obtenidos

de 120 muestras de agua analizadas varían de 24 a 162 mg/l de nitratos, excediendo el límite permisible por las normas, tanto nacionales como internacionales (1 mg/l de nitrógeno equivale a 4.43 mg/l de nitratos), ya que la norma mexicana de calidad para agua potable establece una concentración máxima para nitratos de 22.15 mg/l (SS., 1988) y las normas internacionales señalan como máximo 45 mg/l (U.S. Public Health Service, 1962 y U.S. Environmental Protection Agency, 1976; OMS, 1984) [37].

7.1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La región estudiada se encuentra en el pueblo de Conkal cabecera del municipio del mismo nombre, se localiza en la región centro norte del estado de Yucatán. El municipio queda comprendido entre los paralelos 21°02' y 21°08' latitud norte y los meridianos 89°29' y 89°35' longitud oeste; posee una altura promedio de 13 msnm. Limita al norte con el municipio de Chicxulub Pueblo; al sur con los municipios de Mérida y Tixpéual; al este con los municipios de Yaxkukul, Mocochoá y Tixcocab; y al oeste con el municipio de Mérida. Su superficie es de 57 km² (ver Fig. 7.1) [56].

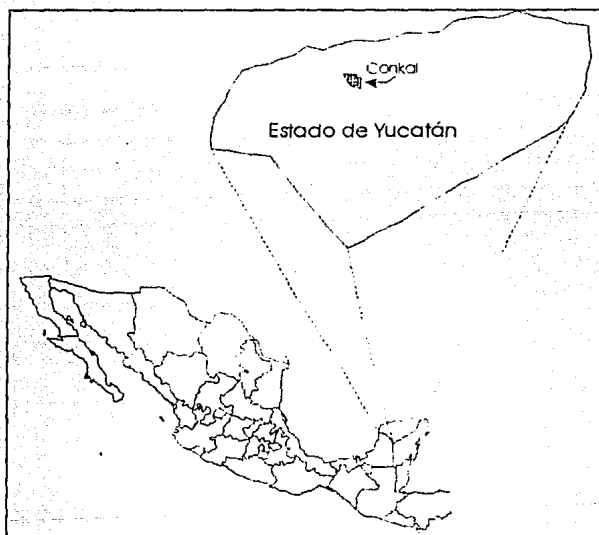


FIGURA 7.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El clima de esta región se describe como subhúmedo con lluvias de verano; estación seca y larga en invierno, por lo común se registra una temperatura media anual de 26.5°C la precipitación pluvial anual varía de 700 mm en su parte norte hasta 1100 mm en su parte sur. La humedad relativa es de 74% y la estación se inicia en mayo y termina en octubre [37].

Las concentraciones de nitratos obtenidas, según ref. [37], en 20 pozos de la localidad. 10 de ellos ubicados en casas particulares y 10 en granjas porcícolas, se muestran en las tablas 7.1 y 7.2.

Existe una diferencia significativa entre las concentraciones de nitratos de las aguas de los pozos ubicados en casas particulares y los de granjas porcícolas, notándose que las primeras presentan una concentración mayor. Esto puede deberse a que el volumen de agua utilizada en las granjas es mucho mayor que el utilizado en las casas particulares, lo que obliga a una circulación dinámica del agua subterránea que logra un efecto de dilución del contaminante nitrogenado.

TABLA 7.1 CONCENTRACIÓN DE NITRATOS (mg/l) EN POZOS UBICADOS EN CASAS PARTICULARES

CASA No.	M E S					
	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
1	68	140	113	118	74	126
2	64	71	68	94	84	96
3	70	95	88	102	94	46
4	62	150	101	114	149	68
5	71	85	87	96	68	102
6	60	127	83	114	84	102
7	55	69	74	78	96	58
8	67	131	81	64	114	106
9	65	104	64	68	94	82
10	61	66	66	94	58	76

TABLA 7.2 CONCENTRACIÓN DE NITRATOS (mg/l) EN POZOS UBICADOS EN GRANJAS PORCÍCOLAS

GRANJA No.	M E S					
	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE
1	72	60	102	125	108	78
2	25	54	64	94	78	72
3	53	80	64	86	54	48
4	24	53	72	116	58	68
5	68	89	82	86	96	88
6	32	61	98	114	38	102
7	56	84	144	66	88	98
8	61	88	162	116	84	62
9	48	75	86	92	114	78
10	68	93	71	98	74	96

La localización de los pozos se muestra en la fig 7.2

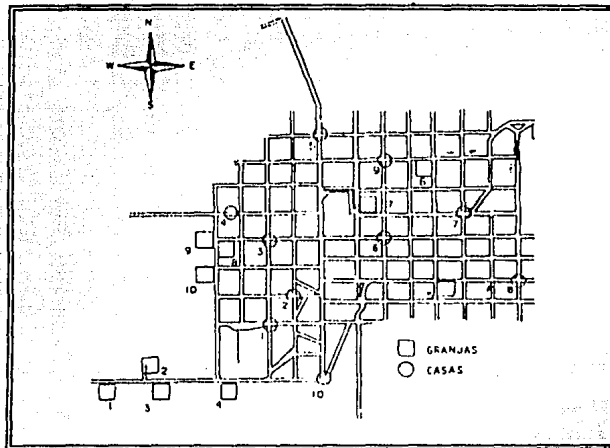


FIGURA 7.2 LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS DE MONITOREO

7.1.2 MÉTODO PROPUESTO DE SANEAMIENTO

La alternativa de solución propuesta es un método biológico para la reducción o eliminación de nitratos por medio de los microorganismos presentes en el subsuelo, dicho proceso es comúnmente llamado "denitrificación" in situ.

7.1.2.1 LA DENITRIFICACIÓN: CONCEPTOS

El contaminante más común identificado en agua subterránea es el nitrógeno disuelto en la forma de nitrato (NO_3^-), debido a que es la forma más estable en que puede encontrarse el nitrógeno. Ese contaminante está siendo ampliamente diseminado debido a actividades agrícolas y a la disposición de desechos en la superficie de la tierra o por debajo de la misma y su presencia en concentraciones no deseables es amenazadora en sistemas de acuíferos grandes [57].

El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas y animales, en el ambiente natural, el ciclo del nitrógeno se desarrolla a través de éstos en una serie compleja de procesos químicos y biológicos. La Fig. 7.3 muestra las fuentes, escapes y trayectorias que integran el ciclo del nitrógeno [58].

Todos los microorganismos requieren nitrógeno para el crecimiento y la síntesis de proteínas. Muchos pueden usar amonio o nitrato, aunque el amonio es preferido ya que está en la forma más fácilmente usada para la síntesis de proteínas [59].

La reducción microbiológica del nitrato en el acuífero es posible en tres diferentes procesos [60]:

- asimilación del nitrato
- amonificación del nitrato
- denitrificación

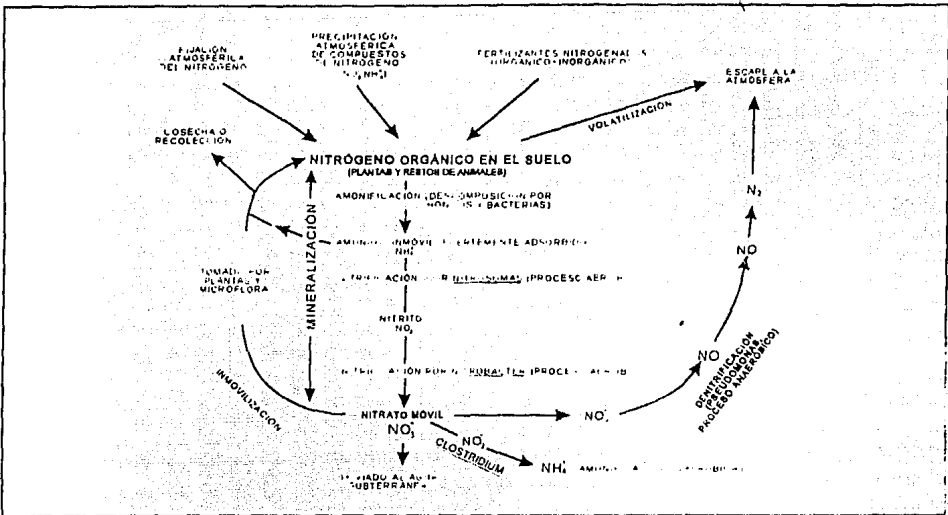
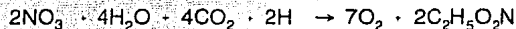
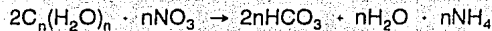


FIGURA 7.3 CICLO DEL NITRÓGENO EN EL SUELO

Algunas bacterias anaeróbicas y aeróbicas son capaces de asimilar el nitrato. Dentro de este proceso, el nitrato será reducido primero a nitrito y entonces a amonio. Este será asimilado durante la síntesis de aminoácidos y será usado por la estructura celular con compuestos de nitrógeno [60]. La reducción de nitrato a amonio para sintetizar proteínas es llamada reducción asimilatoria del nitrato [59]:



La amonificación del nitrato consiste de dos pasos con nitrito como un producto intermedio. Depende de la sustancia orgánica degradable y de las condiciones anaeróbicas. La amonio producida después se encuentra en el agua subterránea [60]:



Las bacterias desnitrificadoras son capaces de usar el oxígeno el cual es fijado al nitrógeno como un aceptor de electrón para su propio consumo de energía durante la oxidación de compuestos con alta energía [60]. La reducción microbiana del nitrato a productos de gas nitrógeno es llamada desnitrificación disimilatoria o respiración de nitrato [59].

La desnitrificación es un proceso que ha sido observado en numerosas investigaciones de sistemas de suelos en laboratorio y campo; dada una fuente de materia orgánica y abundante nitrato, los sistemas bacterianos del suelo son capaces de desnitrificar grandes cantidades de nitratos [57].

Como una definición, la denitrificación se refiere a la reducción disimilatoria por bacterias, de uno o ambos de los óxidos iónicos de nitrógeno (NO_3^- y NO_2^-) a óxidos gaseosos (NO y N_2O), los cuales posteriormente se pueden reducir a gas nitrógeno (N_2) [58].

La denitrificación disimilatoria ocurre cuando el nitrato es usado en lugar del oxígeno como un aceptor terminal de electrones. Las circunstancias que afectan el comienzo de la denitrificación y la extensión del proceso son complejas y variables [59]. Cuando la disponibilidad de oxígeno es limitada, existen cambios considerables en el metabolismo de la energía de la microflora. La respiración aeróbica es reemplazada por la respiración anaeróbica durante la cual, el oxígeno es reemplazado por un aceptor de electrón alternativo. El nitrato es el primer compuesto reducido después del agotamiento del oxígeno [58]. Hay pocas reglas generales para las cuales no han sido encontradas excepciones. Generalmente la denitrificación se considera que es un proceso anaeróbico, ocurriendo en la presencia de nitrato y la ausencia de oxígeno molecular. El producto del proceso se lleva a cabo por una serie de cuatro pasos, desde nitrato a gas nitrógeno ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$) [59], muchas bacterias, sólo pueden desempeñar uno o dos de estos pasos, por lo que la microflora denitrificadora debe ser considerada como un grupo de microorganismos complementarios capaces de llevar a cabo la conversión de NO_3^- a N_2 enteramente [58]. Sorprendentemente, la mayoría de los microorganismos que se conocen como denitrificadores no son estrictamente anaeróbicos, pero además son organismos facultativos, los cuales bajo condiciones anaeróbicas usan nitrato como un aceptor final de electrón [59].

La denitrificación es catalizada por bacterias heterotróficas o autotróficas que derivan sus requerimientos de energía por la oxidación de materia orgánica e inorgánica respectivamente [58].

Se sabe que los géneros bacteriales que contienen especies denitrificadoras incluyen *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Chromobacter*, *Corynebacterium*, *Halobacterium*, *Methanomonas*, *Moraxella*, *Paracoccus*, *Propionibacterium*, *Pseudomonas*, *Spirillum*, *Thiobacillus* y *Xanthomonas* [59].

Denitrificación heterotrófica: La denitrificación es clásicamente considerada como un proceso heterotrófico conducido por microorganismos que requieren un substrato orgánico reducido como fuente de energía y para su síntesis celular [59]. Los microorganismos heterotróficos denitrificadores pueden usar una variedad de fuentes de carbón (azúcar, ácido orgánico, amino ácidos) como fuentes de electrones [58], sin embargo, la mayoría de las investigaciones publicadas consideran el uso de metanol, etanol o ácido acético como substrato para la denitrificación del agua [59].

La mayoría de las bacterias denitrificadoras son heterotróficas. El género *Pseudomonas* incluye a las bacterias más comúnmente aisladas y pueden representar las denitrificadoras más activas en el ambiente natural. Otros grupos importantes son las *Alcaligenes* y *Flavobacterium* [58].

Denitrificación autotrófica: La denitrificación puede ser desempeñada también por bacterias autotróficas, las cuales pueden usar hidrógeno o varios compuestos reducidos de azufre como fuentes de energía. Bajo condiciones de crecimiento autotrófico no se requiere fuente de carbón orgánico, es usado dióxido de carbón o bicarbonato como fuente de carbón para la síntesis celular. Las *Paracoccus denitrificans* y *Thiobacillus denitrificans* pueden denitrificar usando hidrógeno y compuestos de azufre reducidos, respectivamente. Ambas pueden también crecer heterotróficamente si esta presente una fuente de carbón orgánico [59].

7.1.2.2 FACTORES QUE CONTROLAN LA DENITRIFICACIÓN

El oxígeno, el cual compite con el nitrato como un aceptor de electrón en el metabolismo de energía de las células, es un inhibidor importante. El agotamiento gradual de oxígeno, la provisión de condiciones microaerófilas (semi-anaeróbicas) parece favorecer la denitrificación [58].

Algunos autores opinan que la ausencia de oxígeno es una condición necesaria para la denitrificación [60].

La disponibilidad de nutrientes es un requerimiento importante para sostener el crecimiento biológico celular. Los nutrientes necesarios para la biosíntesis consiste de aquellos elementos requeridos en grandes cantidades (C, H, O, P y S), varios minerales requeridos en menores cantidades (K, Na, Mg, Ca y Fe), y cantidades de ciertos metales traza (Mn, Zn, Cu, Co y Mo). La mayoría de las aguas subterráneas contienen adecuadas concentraciones de los minerales necesarios y metales traza para soportar la biosíntesis [58].

La denitrificación está positivamente relacionada al pH con un rango óptimo de 7.0 a 8.0. La temperatura es también un importante factor de control. En bajas temperaturas la denitrificación decrece marcadamente pero es medible entre 0 y 5°C. Puede ser notado un efecto sinérgico de temperatura y oxígeno sobre la denitrificación: a una temperatura alta la solubilidad del oxígeno es menor y así se incrementa la proporción del proceso biológico, y viceversa. Generalmente es posible duplicar la relación de denitrificación con cada 10°C de incremento en la temperatura.

Los denitrificadores son capaces de vivir en un rango de temperatura de 5°C a 65°C. Entre 10°C y 65°C la velocidad de reacción, como se mencionó, se duplicará con cada 10°C pero es sabido que aún en el rango de 8°C a 12°C, la cual es típica de aguas subterráneas, son posibles altas actividades de denitrificación [60].

7.1.3 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Comparado con los métodos superficiales, los métodos subterráneos o de denitrificación in situ tienen la ventaja de desempeñar ambos, la denitrificación y el tratamiento secundario, por ejemplo filtración, degradación de residuos orgánicos y re-aireación dentro del acuífero. Además, los procesos subterráneos son independientes para las variaciones de temperatura de cualquier estación manteniendo así la eficiencia del sistema. Una posible desventaja es el taponamiento de los espacios de poro del acuífero con el gas producido de la denitrificación y la materia biológica muerta [58].

El éxito de la denitrificación in situ depende de la disponibilidad y biodegradabilidad de químicos que puedan ser usados como donadores de electrón para mediar el proceso de reducción del nitrato. En aplicaciones a escala natural, es necesario que la fuente de carbón tal como el metanol o el etanol sean añadidos para facilitar la reacción. La elección de tal fuente de carbón dependerá más comúnmente de consideraciones económicas. Varios investigadores han evaluado la introducción de varios substratos y nutrientes en el acuífero para simular la denitrificación biológica in situ. Los substratos que han sido usados, como ya se mencionó antes incluyen sacarosa, ácido acético, etanol y metanol como substratos orgánicos, así como hidrógeno y azufre reducido como substratos inorgánicos. En muchos casos reportados, fue introducido fosfato como nutriente microbial. En la denitrificación autotrófica se pueden usar el dióxido de carbón u otras fuentes de carbón inorgánico [61].

De acuerdo a relaciones estequiométricas, son requeridos 0.6 mg de sacarosa para reducir 1 mg de NO_3^- . Además, los requerimientos de sacarosa para la reducción del oxígeno

contenido en el agua subterránea es de aproximadamente de 1 mg/l de sacarosa por cada mg/l de oxígeno [62]. La mayoría de las publicaciones de investigaciones y experimentos al respecto, toman en consideración, para la dosificación del sustrato orgánico, además de las relaciones estequiométricas; el tiempo de retención de dicho sustrato en el acuífero; el contenido de bacterias denitrificadoras en el medio; las características del subsuelo y; el sistema de operación del método que puede ser intermitente o continuo. Con respecto a la dosificación de etanol, que es el sustrato más comúnmente utilizado, las dosificaciones van desde 0.8 mg/l [63] de etanol por cada mg/l de nitratos, hasta 1.5 mg/l en un ciclo intermitente [61].

Las eficiencias de remoción de nitratos reportadas van desde 25% hasta 97%, con el uso de diferentes sustratos, así como de diferentes esquemas de operación [58].

7.1.3.1 ESQUEMAS DE SISTEMAS DE DENITRIFICACIÓN

Basado en la literatura y la evaluación conceptual de posibles esquemas, Mercado et al. (1988) definió cuatro alternativas de denitrificación in situ. Cada una de ellas incluye un elemento de inyección de sustrato orgánico al acuífero con el propósito de introducir la fuente de carbón (donador de electrón) requerido para el proceso de denitrificación [62].

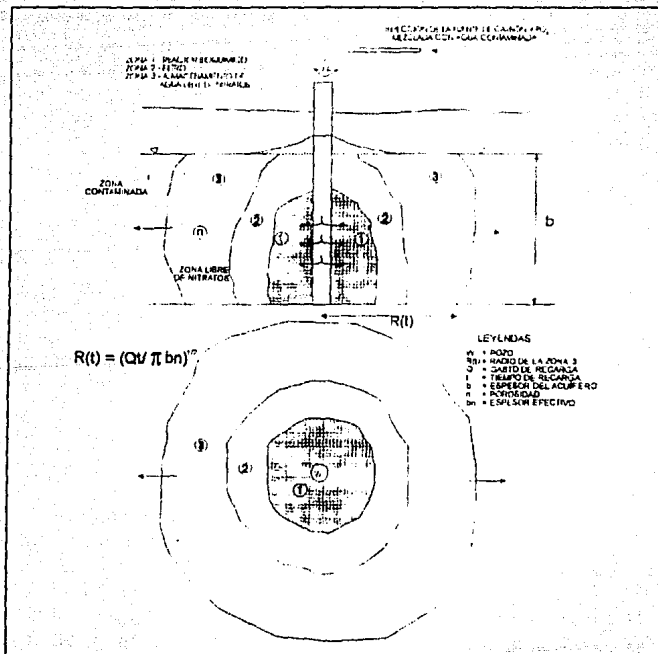


FIGURA 7.4 DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DE LA DENITRIFICACIÓN "IN SITU"

Los efectos de la inyección del substrato orgánico al acuffero son presentado esquemáticamente en la Fig. 7.4 la cual representa la base de todos los esquemas. Las condiciones anóxicas desarrolladas en la vecindad del pozo de inyección crean un reactor biológico natural en la zona 1. En esta zona toma lugar el proceso de denitrificación y el nitrato es reducido a gas nitrógeno. La zona 2 sirve como un filtro en el cual la turbiedad y los sólidos suspendidos son removidos. El agua que pasa la zona 1 y 2 es almacenada, ahora libre de nitratos, en la zona 3 [62].

Los siguientes cuatro alternativas de esquemas, basados en los principios arriba descritos fueron definidos como los principales:

1) *Recarga y Bombeo en el mismo pozo* : El principio de este esquema es demostrado en la Fig. 7.3. Un pozo ordinario es utilizado para la recarga de agua (que puede ser del mismo acuffero y estar contaminada de nitratos), la cual, mezclada con el substrato, es inyectada. Una zona de agua libre de nitrato es creada en el acuffero (zona 3, Fig. 7.3) en la cual el agua descontaminada es almacenada. En una etapa posterior, el agua libre de nitrato es bombeada en el mismo pozo. El principio de este esquema es de operación intermitente en el mismo pozo, consistiendo de recarga y consecuente bombeo.

2) *Sistema doble horizontal, consistente de un pozo de inyección y un pozo de bombeo*. El principio de este esquema es presentado en la Fig. 7.5. Este sistema consiste de dos pozos a una distancia de 10 a 20 m; un pozo es utilizado para la recarga de agua limpia o contaminada, mezclada con substrato orgánico, y el otro pozo es utilizado para el bombeo de agua denitrificada. Este sistema puede abastecer agua denitrificada de calidad constante

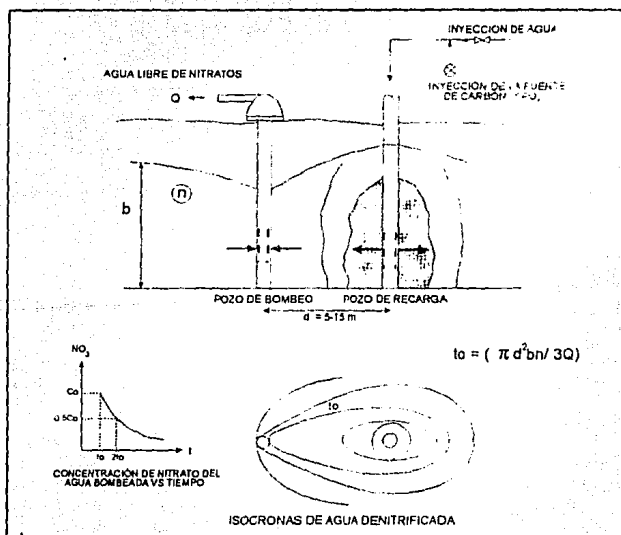


FIGURA 7.5 DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DEL SISTEMA "DOBLE HORIZONTAL"

continuamente. Se espera que bajo condiciones apropiadas de operación no será requerido tratamiento superficial adicional, quizá únicamente desinfección. Es requerido un pozo adicional para abastecer de agua. Este esquema ha presentado en varios experimentos de campo el taponamiento de los espacios de poro del acuífero debido a la acumulación de gas y biomasa.

3) *Sistema doble vertical en un pozo de gran diámetro* : El principio de este esquema es presentado en la Fig. 7.6. El sistema consiste de dos pozos de diferente profundidad localizados cerca uno del otro. Puede también constar de dos tuberías insertadas en el mismo pozo de diámetro grande. Una tubería es usada para la recarga de agua limpia o contaminada mezclada con sustrato orgánico y la otra para la extracción del agua denitrificada. Este esquema es similar al anterior pero en este caso las unidades de reactor biológico y filtración están localizadas verticalmente entre los dos pozos. Es requerido un pozo adicional para el abastecimiento de agua. Nuevamente los problemas de taponamiento pueden limitar el uso de esta alternativa.

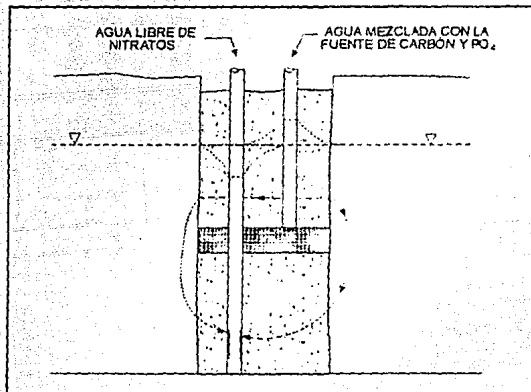


FIGURA 7.6 DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DEL SISTEMA "DOBLE VERTICAL"

4) *Sistema "Daisy"*, consistente de un pozo de producción circundado por una batería de pozos de inyección de pequeño diámetro : El principio de este esquema es presentado en la Fig. 7.7. Este esquema incluye sólo un pozo de bombeo circundado por una batería circular de pozos de pequeño diámetro utilizados para la inyección. Son introducidos el sustrato orgánico y fósforo al acuífero a través de los pozos de inyección y diluidos por el agua contaminada convergiendo al pozo de producción. Se espera que las condiciones de denitrificación se desarrollen a lo largo de las trayectorias de flujo hacia el pozo, provocando la reducción del nitrato en el agua que esta convergiendo a éste para ser bombeada. El grado de la reducción del nitrato es dominado aquí en mayor parte por factores geométricos, tales como el número y espaciamiento de pozos de inyección y de la extensión de la dispersión lateral; puede depender también del tipo de sustrato y de la dosis [62].

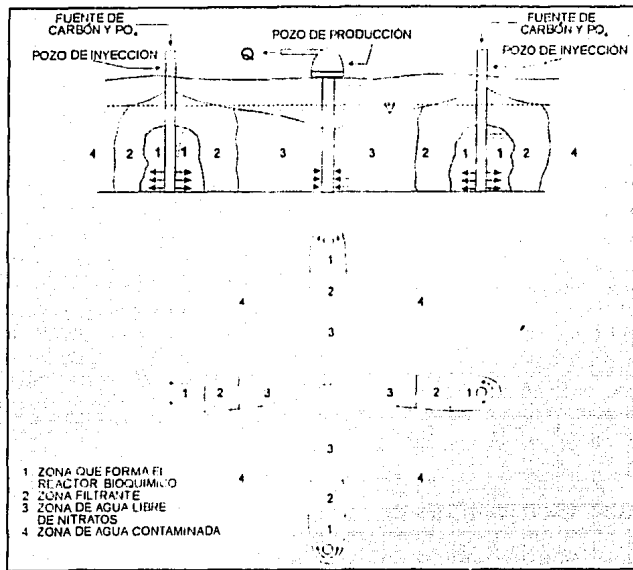


FIGURA 7.7 DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DEL SISTEMA "DAISI"

Un ejemplo más sofisticado del sistema "Daisy" es el método "Nitredox" de tratamiento subterráneo. Con este método el agua dosificada con el sustrato es alimentada al subsuelo mediante una batería de pozos de inyección formando un círculo exterior, y el agua desgasificada y airada es inyectada en un círculo de pozos interior a la batería de pozos de inyección. La desnitrificación ocurre en el círculo exterior, de reducción, mientras la oxidación del nitrato residual y desgasificación del nitrógeno ocurre en el círculo interno de oxidación [58].

7.1.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SANEAMIENTO

De acuerdo a la explicación del funcionamiento del método de saneamiento propuesto, se puede llegar a las siguientes consideraciones en cuanto a su aplicación en nuestra área de estudio.

Tomando como posible sustrato la sacarosa, de acuerdo a Mercado et. al. (1988) la dosis para degradar cada mg/l de nitratos es de 0.6 mg/l de sacarosa, por lo que tomando la máxima concentración de nitratos en el pozo de la granja No. 8 en el mes de julio (Tabla 7.2), siendo ésta de 162 mg/l de nitratos, se tendrían que administrar alrededor de 97.2 mg de sacarosa por cada litro de agua inyectado. Además, por cada mg/l de oxígeno en el agua subterránea se agrega un mg más de sacarosa. Suponiendo 7 mg/l de oxígeno tenemos que nuestra dosis de sacarosa sería aproximadamente un total de 105 mg de sacarosa por litro de agua inyectada, únicamente el pozo mencionado.

Dado que las concentraciones de nitratos difieren considerablemente de un pozo a otro así como temporalmente, sería conveniente tener un control de las concentraciones continuamente, para poder dosificar correctamente.

Ya que las condiciones del medio no permiten el uso de un sistema "Doble Horizontal" y menos aún un sistema "Daysi", ya que la mayoría de los pozos se ubican en una área prácticamente urbana o dentro de las casas habitación y el control de grandes áreas es prácticamente imposible y la colocación de varios pozos no resulta económicamente factible, se propone el uso de un sistema "Doble Vertical" o de un sistema de un pozo de doble propósito, de "recarga y extracción", de operación intermitente, ya que sólo se requeriría otro pozo adicional para el bastecimiento de agua en ambos casos. Sería recomendable controlar los factores que afectan el proceso, como la presencia de bacterias en el medio, control del pH, temperatura y oxígeno disuelto, así como un registro continuo de las concentraciones de nitratos.

Habría que hacer pruebas de permeabilidad del subsuelo para determinar el tiempo medio de residencia y calcular el gasto de recarga requerido así como el de extracción. Se debe además tener un estricto control en cuanto a la proliferación de las bacterias no deseables en el medio ya que existen evidencias de la presencia de coliformes en la región (ref 38), por lo que se recomienda además un proceso de desinfección, como cloración, antes de usar el agua.

7.1.5 OBSERVACIONES DEL MÉTODO

La denitrificación del agua es una área de investigación importante y de rápido desarrollo. Mientras que se ha tenido un gran progreso en esta área, es aún un campo nuevo de estudio y aún queda mucho trabajo por desarrollar. Las áreas que requieren más estudios incluyen:

- 1.- Optimización de las condiciones de reacción con respecto a las concentraciones de sustrato y nutrientes, presión de oxígeno, temperatura y pH.
- 2.- Caracterización de las condiciones que limitan la reacción para determinar si cualquier factor de crecimiento ejerce influencia de transferencia en la relación o extensión de la denitrificación.
- 3.- Mayor evaluación de los sustratos menos estudiados tales como metano y monóxido de carbón y de sustratos alternativos tales como gas digestor anaeróbico.
- 4.- Caracterización y minimización de los efectos inhibitorios causados por reacciones intermedias o por productos.
- 5.- Estudios del comportamiento de los denitrificadores al competir con otros organismos por sustrato, nutrientes, y otros factores de crecimiento.
- 6.- Mayor evaluación de métodos para tratamiento in situ, incluyendo el desarrollo de métodos por introducción de nutrientes y sustrato al acuífero, evaluación de la economía de renovación de acuíferos a gran escala, ya que las áreas de contaminación en el país frecuentemente son extensas; y estudios de efectos a largo plazo de los tratamientos in situ en la calidad del agua subterránea.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

Actualmente el país enfrenta un grave problema debido a la sobreexplotación del agua subterránea. Los problemas más graves que se presentan en las diferentes zonas de explotación en las provincias geohidrológicas del país son: por una parte, la poca captación del recurso agua en el subsuelo, ya sea por mínimas precipitaciones o por la falta de infiltraciones importantes debido a la baja permeabilidad de las rocas en algunas regiones; y por otro lado la explotación no planificada o más bien desmedida que ha obedecido a un crecimiento tanto poblacional, agrícola e industrial provocando que la demanda sea mayor que la disponibilidad, conllevando con esto a la sobreexplotación de muchos de sus abastecimientos subterráneos y así provocando, en las zonas costeras la inmigración aguas adentro, de agua de mar, inutilizando parcial o totalmente las fuentes y en otras regiones por la explotación de agua de estratos muy profundos con muchas sales en disolución o con mucho tiempo de contacto con estas.

Aunado al problema de la sobreexplotación, existe el problema de la contaminación del recurso, en cuanto a agua subterránea se refiere; existen regiones con graves problemas de contaminación como lo es la Comarca Lagunera, Yucatán, el Distrito Federal, la contaminación por retornos urbanos, agrícolas o industriales o algún tipo de infiltración de aguas negras, como es el caso del Valle de Aguascalientes y el Valle de León, y algunas zonas locales como los recientes problemas de fugas de gasolina en alcantarillas en diferentes partes del país. Sin embargo, la más común es la contaminación en formaciones que por su carácter geológico, aunque posean buenas características de permeabilidad y porosidad, presenta en ocasiones lentes de estratos salinos que contaminan el recurso subterráneo y podría afirmarse que un fuerte porcentaje de problemas de este tipo aquejan a los mantos acuíferos nacionales.

Es lamentable también la falta de estudios geohidrológicos de importantes explotaciones subterráneas o en su caso la falta de actualización de los estudios ya existentes de éstas, dada la importancia del recurso a nivel nacional.

En cuanto a nuestra legislación, la problemática de la degradación del ambiente, y concretamente del agua, no es tarea fácil que pueda atender eficazmente el Gobierno Federal, Estatal o Municipal, se trata de una responsabilidad que debemos atender todos y cada uno de nosotros. El hombre debe de superar absolutamente y para siempre dos mitos: El de la

riqueza inagotable de la naturaleza y el de su capacidad ilimitada de recuperación.

Para detectar la contaminación en mantos acuíferos, existe toda una gama de métodos por medio de los cuales puede efectuarse, la desventaja es que para la obtención de resultados satisfactorios o válidos no se puede emplear sólo un método ya que cada uno de ellos se complementa con otro u otros dependiendo del grado de exactitud o confiabilidad que se desee de los resultados y dependiendo de las necesidades de evaluación de la investigación. Muchas veces esta situación no es económicamente factible.

El criterio para la elección de los métodos de saneamiento se debe regir básicamente por tres aspectos importantes como es la eliminación de problema causado por el producto, realizar la tarea dentro de un tiempo razonable y que sea económicamente aceptable. En el país no existe lamentablemente la suficiente información acerca de estos métodos y su aplicación. Además, dado que la mayoría de nuestros problemas se deben a la presencia de estratos salinos en el subsuelo que muchas veces cubren la mayor parte del área de explotación, estos métodos son insuficientes para la solución de nuestra problemática, ya que la mayoría de ellos están enfocados al saneamiento de acuíferos contaminados con hidrocarburos y en una extensión limitada. La eliminación de nitratos, como en el ejemplo mencionado, así como otros contaminantes, por medio de métodos superficiales es preferido al uso de tratamientos in situ debido al desconocimiento que existe en el país de esta tecnología, sería recomendable una mayor difusión e investigación al respecto ya que según la bibliografía, frecuentemente resulta económicamente más factible el uso de tratamientos in situ.

Con todo esto, se puede concluir que en el país las necesidades de investigación y experimentación en este campo, se incrementan día con día, dado el crecimiento demográfico y el desarrollo industrial y agrícola, y que dicho desarrollo conlleva una contaminación potencial de los recursos del subsuelo.

8.2 RECOMENDACIONES

Sería recomendable llevar a cabo más estudios geohidrológicos, así como actualizar los ya existentes, para tener un panorama global de las condiciones de calidad y cantidad del recurso subterráneo.

Es importante también, vigilar que se cumplan las leyes mediante la inspección periódica y el monitoreo de la calidad de las aguas, ya que muchas veces el problema se detecta cuando ya no tiene una solución factible, y en el caso de aguas subterráneas es mucho más importante la prevención. Aunque no se ha tenido un avance considerable en el control de la contaminación del agua en el país, si se ha logrado, por lo menos en alguna extensión que la población en general este consciente de que existe un problema y exija la solución del mismo, sería bueno incrementar este nivel de consciencia, ya que se trata de una responsabilidad que debemos atender todos y cada uno de nosotros. Habría que poner mayor atención en cuanto a la legislación correspondiente a el uso del agua y su sobreexplotación, imponer límites de extracción cuando sea posible y tener un control constante de las zonas de veda.

En cuanto a los métodos de saneamiento, hace falta una mayor investigación y experimentación de los métodos descritos. Es una tecnología con un gran potencial en el campo y merece brindarle más atención y recursos. La evaluación del funcionamiento de dichos métodos sólo se puede efectuar mediante la experimentación.

Básicamente se recomienda incrementar la investigación en ésta área y con esto darle al agua subterránea la importancia que realmente merece, como una de las principales fuentes de abastecimiento tanto doméstico como ganadero e industrial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] México. Secretaría de Desarrollo Social. Instituto Nacional de Ecología. México: Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental 1991-1992. México (MX), SDS, 1993. 377p. ES.
- [2] México. Secretaría de Desarrollo Social. Informe Nacional del Ambiente (1989-1991) para la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo. México (MX), SEDUE, 1992. 196p. ES.
- [3] Velázquez Aguirre, Luis; Ordaz Ayala, Anselmo. Provincias Geohidrológicas de México. Ingeniería Hidráulica en México. México (MX), abril 1992. 20p. ES.
- [4] México. SARH. Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos. Sinopsis geohidrológica del Estado de Aguascalientes. México (MX), SARH, 1987. 70p. ES.
- [5] David Gidi, Alfredo F. Control de la Contaminación del Agua en México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. La Ingeniería Ambiental y la Salud Oaxaca (MX), SMISAAC, 1990. 6p. Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental 7. ES.
- [6] México. SARH. Atlas geohidrológico. México (MX), SARH, 1978. 2v. ES.
- [7] Técnicas Modernas de Ingeniería (México). México (MX), TMI, 1974. 89p. ES. Estudio geohidrológico del Valle de las Palmas en el Estado de Baja California Norte EIGZA-74-23. SRH. Dirección de Geohidrología y Zonas Áridas.

- [8] Técnicas Modernas de Ingeniería (México). México (MX), TMI, 1974. 103p. ES. Estudio geohidrológico del Valle de San Quintin en el Estado de Baja California Norte EIGZA-74-23. SRH. Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas.
- [9] Técnicas Modernas de Ingeniería (México). México (MX), TMI, 1974. 110p. ES. Estudio geohidrológico del Valle de el Vizcalno Territorio de Baja California EIGZA-74-24. SRH. Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas.
- [10] Urias Martínez, Adolfo. Participación de la S.A.R.H. en la solución del problema de hidroarsenismo en la Comarca Lagunera. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Congreso Nacional. Saneamiento Ambiental, 6: El gran reto. México (MX). SMISA, 1988. 4 p. ES.
- [11] México. SRH. Valle de Juárez, Chihuahua: estudio de factibilidad técnica, económica, social y financiera de la rehabilitación del distrito de riego. México (MX), SRH, 1970. 1v. ES. Valle de Juárez, Chihuahua: estudio de factibilidad técnica, económica, social y financiera de la rehabilitación del distrito de riego. CIEPS. Ingenieros Consultores y Proyectistas.
- [12] México. SRH. Dirección General de Aguas Subterráneas. Estudio hidrogeológico de los acuíferos de la zona de veda en la región de Jiménez-Camargo, Chih. México (MX), SRH, 1972. 158p. ES. Estudio hidrogeológico de los acuíferos de la zona de veda en la región de Jiménez-Camargo, Chih. Ariel Construcciones.
- [13] Cárdenas Arredondo, Ramón. Estudio geohidrológico de Xochimilco. México (MX), IMTA, 1990. 272, [17]p. ES.
- [14] México. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México. Oficina de Estudios Especiales. Estudio acerca de la influencia relativa que ejercen, en el hundimiento de la ciudad de México, las extracciones de aguas del subsuelo que por medio de pozos profundos, se efectúan en la propia ciudad y en los municipios colindantes del estado de México. [s.l.] (MX), SRH, 1960. 2v. ES.
- [15] Ariel Construcciones, S.A. Estudio geohidrológico preliminar en los Valles de León y Río Turbio, Gto. México (MX), S.R.H., 1970. 5t. en 3 v. ES. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección de Aguas Subterráneas.
- [16] Geocalli, S. A. Consultores. Actualización del estudio Geohidrológico de los Valles de Tesistán-Atemajac-Ocotlán, Jalisco. México (MX), Geocalli, S.A., 1981. v. ES. Actualización del estudio Geohidrológico de los Valles de Tesistán-Atemajac-Ocotlán, Jalisco. México. SARH. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica.

- [17] México. SRH. Dirección General de Estudios. Geohidrología de los Valles de Atemajac, Tesistán, Ameca, Ahualulco y San Marcos, Jalisco. México (MX), SRH, 1974. 171p. ES. Geohidrología de los Valles de Atemajac, Tesistán, Ameca, Ahualulco y San Marcos, Jalisco. SP 73-19. Ariel Construcciones.
- [18] México. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección de Aguas Subterráneas. Estudio geohidrológico preliminar de los acuíferos de la cuenca del arroyo San Pablo en el desierto del Vizcalno, B.C. México (MX), Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1970. 1v. ES. Estudio geohidrológico preliminar de los acuíferos de la cuenca del arroyo San Pablo en el desierto del Vizcalno, B.C. México. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección de Aguas Subterráneas.
- [19] Banamex. Financiadora de Ventas. Gobierno del Estado de Morelos (México). Estudio geológico y geohidrológico del Valle de Cuernavaca. Mor. México (MX), Banamex, 1970. 125p. ES. Estudio geológico y geohidrológico del Valle de Cuernavaca, Mor. Servicios Geológicos.
- [20] Ledesma Vega, Salvador. Estudio preliminar del comportamiento de los acuíferos en los valles de Querétaro, San Juan del Río y Tequisquiapan en el Estado de Querétaro. México (MX), El autor, 1973. 99p. ES.
- [21] Domínguez Mariani, Eloísa. Estudio hidrogeoquímico preliminar de la zona de San Juan del Río-Tequisquiapan, Querétaro. Jiutepec, Mor (MX), IMTA, 1991. 166p. ES.
- [22] México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Sinopsis geohidrológica del estado de Querétaro. México (MX), SARH, 1988. 55p. ES.
- [23] México. SARH. Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas. Estudio geohidrológico de evaluación en el Estado de San Luis Potosí. México (MX), SARH, 1977. 50p. ES. Estudio geohidrológico de evaluación en el Valle de San Luis Potosí, S.L.P. EIGZA77-16G. Consultores.
- [24] Hidrotec, S.A. Informe final del estudio geohidrológico en las cuencas de los municipios de Villa de Reyes y San Luis Potosí, S.L.P. México (MX), S.R.H., 1972. 2t. en 1v. ES. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección de Aguas Subterráneas.
- [25] Técnicas modernas de Ingeniería (México). México (MX), TMI, 1975. 2v. ES. Interpretación de datos y determinación del potencial actual del acuífero en la Costa de Caborca, Sonora ICS 75-1. SRH. Comité para el Desarrollo de las Cuencas Centro y Norte de Sonora.
- [26] Ariel Construcciones, S.A. Censo de aprovechamiento hidráulicos superficiales y subterráneos en los valles del río Sonora desde Mazocahui hasta Arizpe, Sonora. México (MX), S.R.H., 1970. 3t. en 1v. ES. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección de Aguas Subterráneas.

- [27] Ariel Construcciones, S.A. Estudio hidrogeológico preliminar de los acuíferos de la Costa de Hermosillo, Sonora. México (MX), S.R.H., 1971. 5v. ES. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección de Aguas Subterráneas.
- [28] México. SRH. Dirección General de Aguas Subterráneas. Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos de la Costa de Hermosillo, Sonora. México (MX), S.R.H., 1968. 226p. ES. Estudio Hidrogeológico completo de los acuíferos de la Costa de Hermosillo, Son. EI-68-65. Ariel Construcciones.
- [29] Ariel Construcciones, S.A. Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos del valle de Guaymas, Sonora. México (MX), S.R.H., 1969. 2v. ES. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección de Aguas Subterráneas.
- [30] Gortáez Moroyoqui, Pablo. Problemática ambiental por aguas residuales urbanas, agrícolas e industriales en el valle de el Yaqui. Sociedad Mexicana de Ingeniería sanitaria y Ambiental. Acciones para un ambiente limpio. México (MX), SMISAAC, 1992. 5p. Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 8. ES.
- [31] Foster, Stephen; Ventura, Miguel; Hirata, Ricardo. Contaminación de las aguas subterráneas: un enfoque ejecutivo de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable. Lima (PE), Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1987. 41p. ES.
- [32] México. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Jefatura de Irrigación y Control de Ríos. Estudio Geohidrológico del Valle del Yaqui, Sonora. México, D. F. (MX), SRH. Dirección de Aguas Subterráneas, 1970. Distrito de Riego (41pp) (3 v. en 5 t. 1v. ES.
- [33] México. SRH. Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas. Estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de la Península de Yucatán. México (MX), SRH, 1976. 64p. ES. Estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de la Península de Yucatán NSF704. CONACYT.
- [34] México. SRH. Comisión del Plan Nacional Hidráulico. Informe preliminar del estudio geohidrológico de la región X (Península de Yucatán). México (MX), SRH, 1976. 50p. ES.
- [35] Medidas para el saneamiento del acuífero de Mérida, Yucatán. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Congreso Nacional. Saneamiento Ambiental, 6: El gran reto. México (MX), SMISA, 1988. 3p. ES.

- [36] León Aguilar, Concepción
Reconocimiento geológico del área piloto e interpretación de la disponibilidad de agua en el acuífero Kárstico de Ticimín.
Cuernavaca (MX), IMTA, 1988. 100p. ES.
- [37] Pacheco Avila, Julia; Vázquez Borges, Elizabeth.
Impacto de la porcicultura en el contenido de nitratos del agua subterránea.
Sociedad Mexicana de Ingeniería sanitaria y Ambiental. Acciones para un ambiente limpio.
México (MX), SMISAAC, 1992, 5p. Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 8. ES.
- [38] Vázquez Borges, Elizabeth; Manjarrez Ruiz, Ana.
Impacto Ambiental de la Porcicultura: Contaminación del agua subterránea.
Sociedad Mexicana de Ingeniería sanitaria y Ambiental. Acciones para un ambiente limpio.
México (MX), SMISAAC, 1992, 7p. Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 8. ES.
- [39] Cabrera Sansores, Armando; Pacheco Avila, Julia; Comas Bolio, Manuel.
Contaminación del Agua Subterránea por prácticas agrícolas: el herbicida 2,4-D.
Sociedad Mexicana de Ingeniería sanitaria y Ambiental. Acciones para un ambiente limpio.
México (MX), SMISAAC, 1992, 4p. Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 8. ES.
- [40] Porras Martín, J.; Thauvin, J.P.
Centro Internacional de Formación en Ciencias Ambientales. Aguas subterráneas: Problemas generales de la contaminación.
Madrid (ES), CIFCA, 1978. Cuadernos del CIFCA (7). 81p. ES.
- [41] Gamboa Balderas, Vicente A.
Comentarios a las normas de calidad de agua potable emitidas por la secretaría de salud.
Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Congreso Nacional. Saneamiento Ambiental, 6: El gran reto.
México (MX), SMISA, 1988. 5 p. ES.
- [42] Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación. 1o de diciembre de 1992.
México (MX). ES.
- [43] Hernández Ibarra, León R.
Análisis jurídico de las atribuciones de los gobiernos federal, estatal y municipal, en materia de prevención y control de la contaminación de aguas.
Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Congreso Nacional. Saneamiento Ambiental, 6: El gran reto.
México (MX), SMISA, 1988. 6 p. ES.
- [44] Normas Oficiales Mexicanas. Diario Oficial de la Federación. 18 de octubre de 1993.
México (MX). ES.

- [45] Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación. 28 de enero de 1988. México (MX). ES.
- [46] Foster, Stephen; Hirata, Ricardo
Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas
Lima (PE), Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1991. 41p. ES.
- [47] Custodio E.; Llamas M
Hidrología subterránea.
Barcelona (ES), Omega, 1976. 2v. ES.
- [48] Johnson Division, UOP Inc.
El Agua Subterránea y los Pozos
Minnesota, (US).
- [49] Nielsen, David M.
Practical handbook of ground-water monitoring.
Chelsea (US), Lewis, 1991. X, 717p. EN.
- [50] Cheremisinoff, Paul N.; Gigliello, Kenneth A.; O'Neill, Thomas K.
Groundwater-leachate: modeling/monitoring/sampling.
Lancaster (US), Technomic, 1984. 146p. ES.
- [51] Nyer, Evan K.
Groundwater treatment technology.
New York (US), Van Nostrand Reinhold, 1985. 198p. EN.
- [52] Testa, Stephen M.; Winegardner, Duane L.
Restoration of petroleum contaminated aquiferes.
Chelsea, Mi. (US), Lewis, 1991. XI, 269p. EN.
- [53] Lesser Illades, Juan Manuel.
Contaminación de Acuíferos por fugas de tanques almacenadores de gasolinas.
Querétaro (MX), s/a. 21p. ES.
- [54] Report EPS 2/PN/1
Detección, Prevención and Remediation of Leaks from Underground Storage Tanks.
Canada (CA), 1989, EN.
- [55] American Petroleum Institute. Cost Model for Selected Technologies for Removal of Gasoline Components from Groundwater.
Washington, D.C. (US), API, 1986. API publication (4422).
65p. EN.
- [56] México. Secretaría de Gobernación. Los municipios de Yucatán.
Colección: Enciclopedia de los municipios de México. 548 p.
México (MX), SG, 1988. ES.

- [57] Pacheco Avila, Julia. Evaluación del contenido de nitratos del agua subterránea en una región rural al norte de la Península de Yucatán. Yucatán (MX), 1985. ES.
- [58] Hiscock, K. M.; Lloyd, J. W. y Lerner, D.N. Review of natural and artificial denitrification of groundwater. *Water Resource*, Vol. 25, No. 9, pp. 1099-1111. England, (GB), 1991. EN.
- [59] Gayle, B. P.; Boardman, G. D.; Sherrard, J. H. y Benoit, R. E. Biological Denitrification of water. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 115, No. 5, pp. 930-943. New Yor, N. Y. (US), 1989. EN.
- [60] Rott, U. y Lambert B. Subterranean denitrification for the treatment of drinking water *Water Supply*, Vol. 10, No. 3, pp. 111-120. Hamburg, (GR), 1992. EN.
- [61] Dahab, M. F. Comparasion and evaluation of in-situ bio-denitrification systems for nitrate reduction in groundwater. *Water Science and Technology*. Vol. 28, No. 3-5, pp. 359-368. England, (GB), 1993. EN.
- [62] Mercado, A; Libhaber, M. y Soares, M. I. M. In situ biological groundwater denitrification Concepts and preliminary field tests. *Water Science and Technology*, Vol. 20, No. 3, pp 197-209. England, (GB), 1988. EN.
- [63] Janda, V.; Rudovsky, J.; Wanner, J. y Marha, K. In situ denitrification of drinking water. *Water Science and Technology*, Vol. 20, No. 3, pp. 215-219. England, (GB), 1988. EN.
- [64] Domenico, Patrick A.; Schwartz, Franklin W. *Physical and chemical hydrogeology*. New York (US), John Wiley, 1990. 824p. EN.
- [65] Noonan, David C.; Curtis, James T. *Grounwater Remediation and Petroleum, A guide for underground storage tanks*. Michigan (MX), Lewis Publishers, 1990. 142p. EN.
- [66] Dee, Norbert; McTernan, William F.; Kaplan, Edward. *Detection, control, and renovation of contaminated ground water:proceedings*. New York (US), ASCE, 1987. Symposium on detection, control, and renovation of contaminated ground water. EN.