



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO <sup>1</sup> <sup>2<sup>a</sup></sup>

FACULTAD DE INGENIERIA

**"ALGUNOS CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE  
LA GEOHIDROLOG'A"**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

**INGENIERO PETROLERO**

P R E S E N T A N :

AGUILAR HERNANDEZ RICARDO  
ALFARO GRAJEDA RICARDO  
CASTILLO RAMIREZ ENRIQUE  
HERNANDEZ RAMIREZ MARCO A.  
PEREZ HERNANDEZ JOAQUINA



México, D. F.

**FALLA ORIGEN**

1991



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.

## I N D I C E

	pag.
CAPITULO I " INTRODUCCION "	2
CAPITULO II " EXPLORACION DEL AGUA SUBTERRANEA "	8
II.1.- INTRODUCCION	9
II.2.- METODOS GEOLOGICOS	11
2.1.- Objetivo	
2.2.- Métodos Generales de la Exploración Geológica	
2.3.- Fotogeología Aplicada a la Exploración Geohidrológica	
2.4.- Exploración en Rocas Sedimentarias No Consolidadas	
2.5.- Exploración en Rocas Sedimentarias Consolidadas	
2.6.- Exploración en Rocas Kársticas	
2.7.- Exploración en Rocas plutónicas y Metamórficas	
2.8.- Exploración en Rocas Volcánicas	
2.9.- Exploración en Climas Extremados	
II.3.- METODOS GEOFISICOS	19
3.1.- Clasificación	
3.2.- Métodos Gravimétricos	
3.3.- Métodos Sísmicos	
3.4.- Métodos Eléctricos	

- 3.5.- Otros Registros de Interés en Geohidrología
- 3.6.- Integración de la Información Geofísica a la Exploración Geohidrológica

II.4.- EXPLORACION DIRECTA 30

- 4.1.- Sistema de Captación de Agua Subterránea
- 4.2.- Métodos de Perforación de pozos, Galerías y Drenes
- 4.3.- Desarrollo de los Pozos de Agua
- 4.4.- Estimulación de Pozos de Agua
- 4.5.- Aforo de un Pozo

II.5.- HIDROGEOQUIMICA 41

- 5.1.- Química del Agua del Ciclo Hidrológico
- 5.2.- Muestreo del Agua Subterránea
- 5.3.- Clasificación del Agua Subterránea
- 5.4.- Saturación del Agua Subterránea
- 5.5.- Calidad del Agua para los diferentes usos
- 5.6.- Trazadores
- 5.7.- Contaminación

II.6.- CARTOGRAFIA GEOHIDROLOGICA 55

- 6.1.- Definición e Importancia
- 6.2.- Presentación
- 6.3.- Clasificación de los Mapas Empleados en la Geohidrología

- 6.4.- Forma de Realizar las Cartas Geohidrológicas
- 6.5.- Uso de la Cartografía Geohidrológica en la Exploración del Agua Subterránea

**CAPITULO III " EVALUACION DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS SUBTERRANEOS "** 62

**III.1.- INTRODUCCION** 63

**III.2.- ACTIVIDADES DE CAMPO** 64

- 2.1.- Inventario de las Obras de Captación y Aforo
- 2.2.- Selección de Pozos de Observación
- 2.3.- Obtención de Profundidades al nivel del Agua en Pozos de Observación
- 2.4.- Determinación de los Volúmenes de Extracción de Agua Subterránea
- 2.5.- Aforo de Manantiales y Corrientes Superficiales.
- 2.6.- Selección de Pozos para Pruebas de Bombeo y su Ejecución

**III.3.- ACTIVIDADES DE GABINETE** 77

- 3.1.- Determinación de los Volúmenes de Precipitación
- 3.2.- Determinación de los Volúmenes Escurridos
- 3.3.- Determinación de los parámetros Infiltración y Evapotranspiración

**III.4.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS NIVELES DEL AGUA  
SUBTERRÁNEA 90**

**4.1.- Piezometría**

**III.5.- PRUEBAS DE BOMBEO 98**

**5.1.- Pruebas de Bombeo en Régimen Estable**

**5.2.- Pruebas de Bombeo en Régimen  
Transitorio**

**5.3.- Acuíferos Semiconfinados con Flujo  
Vertical**

**III.6.- MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO GEOHIDROLÓ-  
GICO Y BALANCE GLOBAL DEL ACUÍFERO 115**

**6.1.- Definición de Modelo de un Acuífero**

**6.2.- Información Requerida para formar un  
Modelo**

**6.3.- Tipos de Modelos**

**6.4.- Proceso de Modelación. Modelo Conceptual**

**6.5.- Utilización de Modelos de Acuíferos**

**6.6.- Obtención de los Datos**

**6.7.- Presentación de los Datos**

**6.8.- Balance Global de un Acuífero**

CAPITULO IV " MANEJO DE ACUIFEROS "	126
IV.1.- INTRODUCCION	127
IV.2.- CAPTACION Y OPERACION DE LA DISPONIBILIDAD HIDRAULICA	128
2.1.- Captaciones de Agua	
2.2.- Concepto de Régimen Permanente y Régimen No Permanente	
2.3.- Efectos de la Anisotropía y Heterogeneidad de los Acuíferos Reales en las Captaciones	
2.4.- Concepto de Caudal Específico y Eficiencia de un pozo	
2.5.- Campos de Bombeo	
2.6.- Efectos de los límites de los Acuíferos	
IV.3.- ALTERNATIVAS DE SOLUCION	139
3.1.- Fórmulas Básicas	
3.2.- Métodos de Solución	
IV.4.- SOBREENPLOTAION Y HUNDIMIENTO	148
4.1.- Antecedentes	
4.2.- Importancia del Agua Subterránea	
4.3.- Problemática del Agua Subterránea	
4.4.- Componentes y Manejo del Agua Subterránea	
4.5.- Sobreexplotación de Acuíferos en México	
4.6.- Soluciones a los Problemas Generados por la Sobreexplotación	
4.7.- Disposiciones Institucionales Referentes al Agua Subterránea	
4.8.- Hundimiento	

<b>IV.5.- INTRUSION SALINA Y CONTAMINACION</b>	<b>157</b>
5.1.- Intrusión Salina	
5.2.- Definición	
5.3.- Frontera Abrupta y Frontera de Difusión	
5.4.- Difusión y Dispersión	
5.5.- Propiedades del Agua Marina	
5.6.- Posición de la Cuña de Agua Salada	
5.7.- Métodos de Prevención y Control	
5.8.- Contaminación	
<b>IV.6.- SIMULACION DE ACUIFEROS</b>	<b>172</b>
6.1.- Generalidades	
6.2.- Ecuación del flujo en el Acuífero	
6.3.- Métodos Generales de Tratamiento Numérico	
6.4.- Planteamiento General del Problema por el Método de Diferencias Finitas	
6.5.- Condiciones de Frontera	
<b>CAPITULO V " SITUACION DE LA GEOHIDROLOGIA EN MEXICO "</b>	<b>180</b>
V.1.- INTRODUCCION	<b>181</b>
V.2.- FACTORES CONDICIONANTES DE LA PRESENCIA DEL AGUA SUBTERRANEA	<b>182</b>
2.1.- Precipitación	
2.2.- Geología	



**V.3.- REGIONALIZACION DE LOS ACUIFEROS**

**187**

**3.1.- Acuíferos en Aluviones Recientes**

**3.2.- Acuíferos Regionales en Calizas**

**3.3.- Acuíferos Regionales en Cuencas  
Terciarias**

**V.4.- REGIONES GEOHIDROLOGICAS DE MEXICO**

**190**

**4.1.- Región Noroeste**

**4.2.- Región Norte**

**4.3.- Región Noreste**

**4.4.- Región Centro**

**4.5.- Cuenca de México**

**4.6.- Región Sureste**

**4.7.- Resumen del Capítulo V**

## PREFACIO

Las limitaciones y contaminación del agua superficial han provocado que el agua subterránea se explote en los últimos años; sin embargo, el crecimiento acelerado de la población y de la industria han provocado su sobreexplotación, poniendo en peligro la existencia de este líquido vital y la renovación de los acuíferos. Por lo tanto, se considera de suma importancia el estudio cuidadoso y consciente de todos los factores que afectan su explotación, tomando en cuenta que este vital recurso es un elemento fundamental en el aspecto social, político y económico de toda nación, que debe ser considerado, para que las futuras generaciones de ingenieros relacionados con el subsuelo se enriquezcan del tema, para que lleguen a adquirir un criterio más amplio en cuanto a su explotación y aprovechamiento óptimo.

Por lo tanto, este trabajo tiene como finalidad ser un medio de consulta para estudiantes y personal técnico involucrado en su explotación.

## CAPITULO I

### " INTRODUCCION "

## CONTENIDO

Este trabajo de tesis de carácter bibliográfico fue realizado por cinco estudiantes, que participaron de manera activa en el primer seminario optativo de Geohidrología II, adscrito a la carrera de Ingeniería Petrolera.

Además del presente, la tesis consta de otros cuatro capítulos, cuyo contenido se resumirá a continuación.

### CAPITULO II : EXPLORACION DEL AGUA SUBTERRANEA

La investigación de las condiciones geohidrológicas de una región y la exploración del agua subterránea son actividades interdisciplinarias, es decir, requieren de la participación de profesionales de muy distinta índole: geólogos, geofísicos, químicos, perforadores, físicos, etc. De especial interés son los estudios geológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos y el reconocimiento de las obras de captación existentes en la región. Todos estos temas son tratados durante el desarrollo de este capítulo.

Se hace mención además del funcionamiento y construcción de los principales tipos de sistemas de captación del agua: pozos verticales, drenes horizontales y galerías. Finalmente, se mencionan los conceptos de la Cartografía Geohidrológica.

### CAPITULO III : EVALUACION DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS

La evaluación del volumen de agua en un acuífero determinado, es imprescindible para poder tener un control sobre la explotación.

El proceso de la evaluación conlleva un gran número de actividades tanto de campo como de gabinete, tales como: piezometría, determinación de gastos, volúmenes precipitados, volúmenes escurridos superficialmente, etc.

Dado el carácter cuantitativo de los principales parámetros que permiten efectuar el control de la explotación del acuífero, su determinación requiere a menudo de la aplicación de métodos matemáticos, estadísticos o gráficos, que son tareas de gabinete para el geohidrólogo. Entre estos métodos se tienen la interpretación de las pruebas de bombeo y la determinación de los volúmenes precipitados.

### CAPITULO IV : MANEJO DE ACUIFEROS

En este capítulo se mencionan los problemas que se tienen durante la explotación de los acuíferos, las alternativas de solución y el proceso de simulación matemática de acuíferos.

Existen problemas típicos muy frecuentes durante la explotación de los acuíferos, que obligan en muchos casos a las autoridades de cada región a tomar severas medidas para contrarrestar o aminorar al menos el daño. Entre estos problemas están : sobreexplotación, hundimiento del terreno, agrietamiento del mismo, intrusión del agua del mar en los acuíferos costeros, contaminación de acuíferos y otros más.

La simulación, por su parte, es la última etapa en el estudio del comportamiento de un acuífero. Con la simulación es posible determinar cuál será la situación de los niveles freático o piezométrico cuando se somete al acuífero a un cierto ritmo de explotación. De este modo, es fácil decidir qué política de extracción se seguirá, lográndose así el adecuado manejo de un recurso tan preciado como es el agua.

#### CAPITULO V : SITUACION DE LA GEOHIDROLOGIA EN MEXICO

Los estados de la República Mexicana se clasificaron según la división administrativa que se hace en la CNA (Comisión Nacional del Agua). De cada entidad se mencionan: situación y problemática general, los acuíferos más importantes, el número de pozos, los valores de la recarga y la extracción anual, y otros datos más. A manera de introducción de este capítulo, se incluyen además mapas de la geología, de isoyetas y de regionalización de acuíferos del territorio nacional, por considerarlos muy ilustrativos.

## CONCEPTOS BASICOS

### Definición de Geohidrología

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

### Tipos de acuíferos

Un acuífero se define como un estrato ó formación geológica que, permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades. Se tienen esencialmente tres tipos de acuíferos : libre, confinado y semiconfinado.

### Acuífero libre

También llamado no confinado o freático. Es aquél en el cual existe una superficie libre del agua encerrada en él, que está en contacto directo con el aire y por lo tanto, a presión atmosférica. Al perforar pozos que lo atraviesen total o parcialmente, la superficie obtenida por los niveles del agua de cada pozo, forma una superficie real conocida como nivel freático, que coincide con el nivel de saturación del acuífero por estar sujeto a la presión atmosférica.

### Acuífero Confinado

También llamado cautivo o a presión. Son acuíferos limitados inferior y superiormente por formaciones impermeables. El agua de los acuíferos confinados está sometida a una cierta presión superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros de la formación geológica que la contiene, saturándola totalmente. Por eso, durante la perforación de pozos en acuíferos de este tipo, al atravesar el techo del mismo se observa un ascenso rápido del nivel del agua hasta estabilizarse en una determinada posición. Así pues, estos acuíferos poseen una superficie piezométrica ideal, que puede materializarse considerando todos los niveles que alcanzaría el agua en las perforaciones distribuidas por el acuífero.

### Acuífero Semiconfinado

Es un caso particular de un acuífero confinado en el que las formaciones inferior y/o superior que lo encierran no son totalmente impermeables y por lo tanto pueden recibir una recarga o descarga a través de ellas.



## **CAPITULO II**

### **" EXPLORACION DEL AGUA SUBTERRANEA "**

## II.1.- INTRODUCCION

La exploración del agua subterránea es un paso previo imprescindible para la explotación y uso de la misma. Si no se tiene éxito en la localización de un acuífero que cubra las necesidades específicas de demanda de agua, el proyecto total deberá eliminarse.

Es por esto que la exploración en esta área se ha valido de todas las técnicas posibles que le permitan ser efectiva y precisa. Así es como surgen técnicas tales como los métodos geológicos, métodos geofísicos, exploración directa, Hidrogeoquímica y Cartografía Geohidrológica, entre otras. Las técnicas anteriores se explicarán más ampliamente en este capítulo.

Por otro lado, los tipos de estudios de exploración varían de acuerdo con los objetivos que se persiguen, teniendo tres tipos fundamentales:

(a) Estudios preliminares o de reconocimiento, los cuales tienen como objeto fundamental la localización de los embalses subterráneos más importantes, y una primera estimación de sus dimensiones, de sus parámetros hidrológicos, de las zonas de recarga y descarga y de la calidad del agua.

(b) Estudios generales, los cuales conducen a una cuantificación más aproximada de los embalses subterráneos localizados en los estudios preliminares.

(c) Estudios de detalle, para pormenorizar el conocimiento del acuífero.

Para llevar a cabo una eficiente exploración se requiere principalmente la aplicación de conocimientos técnicos, experiencia en la perforación de pozos y sentido común.

## II.2.- METODOS GEOLOGICOS

### 2.1.- Objetivo

Los métodos geológicos tienen como finalidad la localización de acuíferos o embalses subterráneos de los que se puede obtener agua en cantidades y de calidad adecuadas para el fin que se pretende.

### 2.2.- Métodos generales de la exploración geológica

Estos métodos se basan esencialmente en la cartografía geológica de superficie, que a su vez consiste en registrar en un plano la naturaleza litológica o estratigráfica y las características estructurales de los afloramientos de las rocas. De estos datos (juntamente con los de los sondeos mecánicos y la prospección geofísica), se deduce su disposición en la profundidad y la historia geológica de los materiales.

Recientemente el estudio de las fotografías aéreas constituye un excelente instrumento para la Cartografía Geológica, pues además de permitir "llevarse el campo a casa" en ocasiones pone de relieve aspectos difíciles de ver sobre el propio terreno.

### 2.3.- Fotogeología aplicada a la exploración geohidrológica

La fotogeología es la interpretación de las fotografías aéreas con objeto de describir las características de la geomorfología y de la geología del territorio estudiado, con las cuales es posible realizar un mapa fotogeológico.

La fotografía aérea permite determinar la naturaleza litológica, formas estructurales, inclinación de las pendientes, naturaleza de la vegetación, densidad de la red de flujo de agua, color de los afloramientos, la sucesión, los niveles, el buzamiento, dirección y la potencia de los diferentes niveles, también es posible determinar las manifestaciones volcánicas y las formas estructurales del terreno.

El examen, la utilización y la interpretación de las fotografías aéreas, oblicuas o verticales, aportan una ayuda cada vez mayor a la prospección geohidrológica.

#### 2.4.- Exploración en rocas sedimentarias no consolidadas

Las rocas sedimentarias no consolidadas son depósitos originados por algún o algunos agentes externos que pueden ser los ríos, los glaciares o los vientos. Los sedimentos no consolidados corresponden casi siempre a materiales depositados en épocas geológicamente recientes, por lo general del Cuaternario o del Terciario Superior. Los materiales depositados están constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas, cuya composición mineralógica y/o petrográfica depende en gran parte de la roca madre de la que proceden.

Estas rocas se clasifican desde un punto de vista genético; es decir, atendiendo primordialmente al agente o agentes externos que las originaron y al ambiente sedimentario en que se depositaron, teniendo la siguiente clasificación de tipos de depósitos:

- Depósitos de origen fluvial
- Depósitos en los valles de origen tectónico
- Depósitos de origen eólico
- Depósitos de las llanuras costeras
- Depósitos de origen glaciar

Los sedimentos no consolidados suelen tener una alta porosidad efectiva y una alta permeabilidad, dependiendo del tipo de depósito que se tenga. En la tabla 1 se observan los rangos de porosidad y permeabilidad para cada tipo de depósito. Davis y de Wiest (1966) plantea cinco razones que explican el interés de los acuíferos formados por rocas no consolidadas en los trabajos de exploración de agua subterránea:

(a) Este tipo de depósitos se localiza en el fondo de los valles, donde los niveles piezométricos están más próximos a la superficie y consecuentemente, la elevación de bombeo es pequeña.

(b) Este tipo de depósitos son fáciles de perforar, por lo que la exploración es más rápida y barata.

(c) Estos sedimentos tienen una ubicación favorable para recibir una recarga de ríos o lagos.

(d) Los sedimentos no consolidados suelen tener una mayor porosidad efectiva que los otros.

(e) Quizás la razón más importante es que su permeabilidad suele ser mucho más elevada que la de las demás formaciones.

## 2.5.- Exploración en rocas sedimentarias consolidadas

Las rocas sedimentarias consolidadas son aquellas que se han formado por litificación o diagénesis de depósitos sedimentarios de origen detrítico o químico (ver tabla 2).

Dentro de una misma formación puede ser importante conocer las características de su fracturación, que puede ser debida a movimientos tectónicos, plegamientos y otros procesos geológicos. En las areniscas muy cementadas y en las lutitas, estas fracturas son las vías que permiten el flujo del agua subterránea.

Estos depósitos generalmente están asociados con grandes cuencas artesianas, cuando se alteran capas permeables y de poca permeabilidad.

Tipo de depósito	Porosidad	Permeabilidad
arcillas	33 - 48 %	1E-5 - 1E-3
límos	34 - 50 %	3E-5 - 2E-1
arenas	36 - 50 %	0.5 - 25
gravas	Muy alta	2

TABLA 1.- Porosidad y permeabilidad de depósitos sedimentarios.

Origen	Composición	Tamaño	Nombre
detritico	fragmentos	> 2mm	conglomerado
	de rocas	0.06 - 2	arenisca
	antiguas	< 0.06mm	arcilla
Químico	yeso, sal	microscópico	evaporita
Inorgánico	dolomita	excepto en	dolomía
	calcita	crystalización	caliza
Bioquímico	restos veg.	muy variado	carbón

TABLA 2.- Clasificación elemental de las rocas sedimentarias consolidadas.

La porosidad de estas rocas es función del ámbito sedimentario original, pero posteriormente se ve modificada por procesos tales como compactación y cementación, y, en menor término, la fracturación. Un valor típico de porosidad es de 10%. La permeabilidad, si se trata de rocas de grano fino, es muy baja (hasta de  $10^{-8}$  m/día), en cambio si se trata de areniscas y conglomerados, este valor aumentará (de  $10^{-3}$  a 1 m/día).

A nivel mundial, sin embargo, los acuíferos de las rocas consolidadas están menos explotados que los de materiales sedimentarios no consolidados, debido probablemente a la poca seguridad que se tiene de obtener el caudal deseado y al mayor costo de los pozos realizados en los materiales consolidados.

## 2.6.- Explotación en rocas kársticas

El término karst se refiere a aquellas formaciones geológicas constituidas por rocas sedimentarias consolidadas y cuyos poros o fisuras han sido ensanchadas por la acción disolvente del agua subterránea hasta formar grandes conductos y cuevas que dan lugar a características geomorfológicas típicas. Las rocas en las que la acción disolvente del agua produce estos efectos, son las calizas, las dolomías, los yesos, la sal común y casi todas las restantes rocas evaporíticas. Desde el punto de vista geohidrológico, el interés primordial está en las calizas y dolomías, ya que el agua proveniente de depósitos de yeso y sal común, suele tener un contenido de sales excesivamente elevado para que sean aprovechadas por el hombre.

El valor de la porosidad de las rocas kársticas varía con el tiempo; debido a los diversos procesos de diagénesis se tienen valores desde 20 a 50%.



En cuanto a la permeabilidad los valores son extremadamente variables dependiendo del tipo de roca que se tenga; sin embargo, en general es fuertemente anisótropa debido a la circulación preferente según los conductos de disolución. Por lo anterior, se deberá ser muy prudente en la deducción de las direcciones de flujo basadas en las líneas equipotenciales, ya que en estos casos la dirección de flujo no es perpendicular a dicha línea (equipotencial).

En cuanto a la calidad del agua, ésta suele ser bicarbonatada calcio - magnesiana y su contenido total de sales rara vez rebasa las 500 ppm. En cambio, el peligro de la contaminación es frecuente.

#### 2.7.- Exploración en rocas plutónicas y metamórficas

Las rocas plutónicas o intrusivas son aquellas que se han formado en el interior de la corteza terrestre, bien sea por el lento enfriamiento o bien por los lentos procesos de ultrametamorfismo que transforman lentamente las rocas originales del tipo que sean, en rocas metamórficas, después en magmas y, finalmente, en rocas plutónicas.

Las rocas metamórficas, por su parte, se han originado mediante un complejo conjunto de transformaciones de otras rocas sedimentarias o ígneas, debido fundamentalmente a cambios de presión y temperatura.

Dentro del grupo de rocas intrusivas, las más comunes son el granito y la diorita. De las metamórficas abundan más los mármoles, el gneis y las pizarras. En su conjunto, ambos tipos de materiales son muy poco permeables y tienen una capacidad muy reducida como embalses subterráneos. Sin embargo, procesos tales como el intemperismo y la fracturación aumentan el interés geohidrológico en lugares donde no hay acuíferos mejores.

El agua procede principalmente de las zonas meteorizadas. Tanto la meteorización como la fracturación suelen ser más intensas cerca de la superficie que en el subsuelo.

En cuanto a la porosidad, ésta varía en función de que la roca esté o no meteorizada, y los valores varían de 1% para una roca sana y 30% para una meteorizada. Igualmente, la permeabilidad primaria suele variar en un rango de  $10^{-8}$  m/día para roca sana y  $10^{-3}$  para roca meteorizada.

Finalmente se tiene que la media de los caudales en este tipo de rocas oscila entre 60 y 150 m<sup>3</sup>/día y que el agua de estos acuíferos es generalmente pura con pequeñas cantidades de calcio, sodio, magnesio y potasio.

## 2.8.- Exploración en rocas volcánicas

Las rocas volcánicas son las que se han originado por la solidificación de un magma fundido sobre o cerca de la superficie de la Tierra. En ellas se incluyen los piroclastos, que son fragmentos de grava líquida que solidifican en el aire al ser proyectados por las erupciones volcánicas, dando origen a la formación de rocas no consolidadas.

La porosidad de las rocas volcánicas varía según su origen. En las zonas donde la solidificación ha sido relativamente lenta como en las chimeneas o calderas, la porosidad es inferior al 5%. Estos mismos materiales, cuando escurren sobre la superficie en forma de coladas o piroclastos, su porosidad varía de 30 a 50%.

En cuanto a la permeabilidad, ésta varía al igual que la porosidad en función al origen. Los materiales piroclásticos rara vez tendrán permeabilidades mayores a  $10^{-2}$  m/día; en cambio, para las coladas basálticas se encuentran valores medios de permeabilidad de hasta 1000 m/día.

Una importante característica hidrológica de las formaciones volcánicas, es la frecuente presencia de barreras impermeables o poco permeables con disposición casi paralela al buzamiento de las coladas, o casi vertical al buzamiento.

Los pozos en este tipo de rocas pueden dar a veces caudales espectaculares o con descensos mínimos, pero en la misma formación y a poca distancia, pueden ser prácticamente estériles.

## 2.9.- Exploración en climas extremados

Los valores extremados de temperatura y precipitación en el mundo tienen una gran influencia sobre la existencia y el movimiento del agua en el subsuelo. Las temperaturas extremadamente bajas pueden inmovilizar prácticamente el agua, al convertirla en hielo. Por otro lado, las temperaturas extremadamente altas pueden provocar una gran evaporación y transpiración, que únicamente deja una pequeña parte de agua para llenar los depósitos. Estos climas extremados son característicos de los desiertos y tierras permanentemente heladas.

En los desiertos, la precipitación total puede variar desde cero hasta 200 mm/año. La cantidad de recarga de agua subterránea en una región desértica, es muy pequeña a causa de la evapotranspiración, que excede normalmente los 1000 mm/año. La recarga media en casi todos los desiertos es menor al 1% de la precipitación total. Las únicas zonas de desierto con grandes cantidades de agua de recarga son aquellas situadas junto a ríos caudalosos (ver la figura 1).

En las tierras permanentemente heladas, que se encuentran en casi todos los lugares del interior del círculo polar ártico, la búsqueda de agua subterránea es fundamentalmente una búsqueda de zonas localmente desheladas. Naturalmente, la investigación se dirigirá también hacia las zonas permeables que puedan encontrarse, para extraer cantidades apreciables de agua.

## II.3.- METODOS GEOFISICOS

La prospección geofísica se define como la ciencia y técnica que a partir de fenómenos físicos, naturales o provocados, trata de conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y sus propiedades. Es ciencia, porque se basa en fenómenos científicamente establecidos; es técnica, porque utiliza equipos y métodos técnicos para estudiarlos en las zonas accesibles.

Con los métodos geofísicos se estudian las variaciones medibles de algunas propiedades físicas del subsuelo, tales como la densidad, la conductividad eléctrica, la susceptibilidad magnética, el potencial eléctrico y la elasticidad. Algunos métodos permiten medir directamente la presencia de agua en el subsuelo, mientras que otros no; no obstante, las aplicaciones más útiles de todas las técnicas geofísicas consisten en la interpretación de las estructuras geológicas y en la determinación de la estratigrafía regional, eliminando así la necesidad de programar amplias campañas de perforación.

### 3.1.- Clasificación

Aquí no se mencionan la totalidad de los métodos existentes, sino sólo aquéllos que son de aplicación a la Geohidrología.

Métodos Geofísicos

Métodos Gravimétricos

Métodos Sísmicos

Métodos Eléctricos

Otros Métodos

A continuación, se mencionarán por separado la importancia, el uso y las limitaciones de estos métodos.

### 3.2.- Métodos Gravimétricos

Estudian las anomalías de la gravedad en la superficie terrestre para deducir la distribución y naturaleza general del subsuelo.

Los instrumentos más comunmente utilizados son los gravímetros. Estos miden los efectos directos de la atracción de la gravedad sobre una masa suspendida de un resorte calibrado. Las variaciones de la elongación del resorte están directamente relacionadas con la intensidad vertical del campo gravitatorio, pudiéndose obtener aproximaciones del orden de  $10^{-8}$  utilizando métodos ópticos o eléctricos que permitan amplificar el movimiento del resorte.

Desde el punto de vista teórico, se pueden obtener infitas interpretaciones. Supuestas las variaciones de la densidad de las rocas y las características geológicas, tales como fallas, plegamientos e intrusiones, en circunstancias ideales pueden obtenerse resultados cualitativos moderadamente exactos tales como las profundidades de los depósitos aluviales.

Aunque en la delimitación de los valles fósiles de gran extensión los métodos gravimétricos han llegado a dar buenos resultados, se emplean muy raramente en la prospección geohidrológica, ya que no permiten, por lo general, detectar los pequeños cambios geológicos.

### 3.3.- Métodos Sísmicos

Son los métodos geofísicos más exactos y potencialmente más útiles. A diferencia de los métodos gravimétricos, los métodos sísmicos no miden un campo natural de las fuerzas, virtualmente estático, sino la reacción de las masas geológicas frente a vibraciones inducidas artificialmente.

Estas vibraciones se detectan a distancias diferentes y según varían direcciones de la fuente de energía, mediante pequeños sismómetros, llamados habitualmente geófonos o captore, los cuales permiten registrarlos sobre papel fotográfico o en cintas magnéticas.

En todos los equipos de prospección sísmica existen los siguientes elementos: un dispositivo para explosionar las cargas, que está unido eléctricamente al elemento registrador donde queda marcado el tiempo de origen de la explosión; unos elementos para registrar las llegadas de las ondas: captore o geófonos; un circuito de amplificación de las señales captadas; un elemento de registro de las señales emitidas por los geófonos y magnificadas por el amplificador.

Los materiales no consolidados, como por ejemplo las gravas, transmiten las ondas más lentamente que las rocas cristalinas y, en consecuencia, se pueden deducir los menores tiempos de llegada a partir de la onda de energía.

Un dispositivo ideal para el reconocimiento relativamente rápido de un paleocauce es el conocido con el nombre de dispositivo en abanico, en el que los sismómetros se reparten a lo largo de un arco de circunferencia centrada en el punto de tiro (ver la figura 2).

Un método muy interesante, desde el punto de vista cuantitativo, es el de refracción, en el cual los geófonos se alinean a partir de un punto de tiro según una recta única. Así se observan las primeras llegadas o frentes de ondas, que serán longitudinales en todo su recorrido, y las más rápidas de todas las generadas en el origen de la perturbación. Las ondas que se propagan por el terreno, supuesto que poseen velocidad constante, tardarán tiempos proporcionales a la distancia entre el punto de explosión y los geófonos.

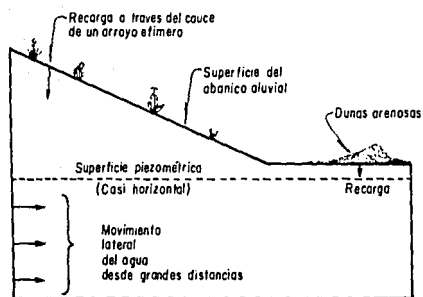


Fig 1.- Recarga a través del suelo de un desierto.

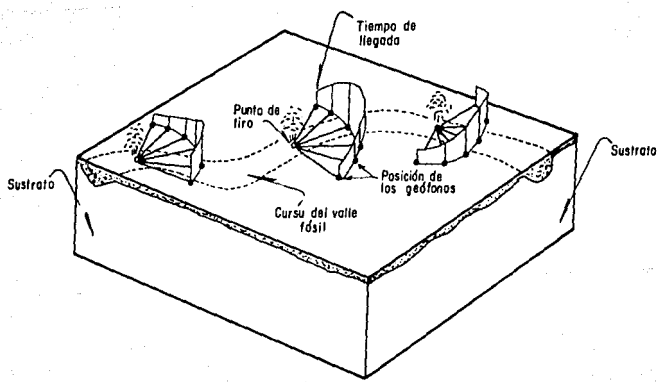


Fig 2.- Dispositivo en abanico.

Si la velocidad de las ondas varía, se perderá esta proporcionalidad, pero los tiempos transcurridos entre cada dos puntos de observación situados en un mismo terreno, serán inversamente proporcionales a la velocidad en este terreno.

En la Geohidrología, el método de refracción puede utilizarse para conocer la distribución del terreno, determinar el espesor de los acarreos, localizar fallas y zonas tectonizadas, facilitar la situación de los niveles freáticos en los acarreos y permite obtener un valor aproximado de la porosidad.

Por su parte, el método de reflexión utiliza equipos muy análogos a los de refracción sísmica, pero con mayor número de canales y geófonos. Estudia las ondas en los distintos niveles del subsuelo, lo que supone prescindir de las refractadas y analizar las llegadas de sucesivos frentes de ondas longitudinales o de compresión. Pueden alcanzarse profundidades de interpretación superiores a los 6000 metros, y, por el contrario, no se presta en la actualidad para estudiar los primeros 100 - 200 metros, ya que las ondas directas o refractadas ciegan esta zona al confundirse y predominar sobre las anteriores.

Se utilizan ampliamente en la investigación petrolífera y poco en los estudios geohidrológicos.

### 3.4.- Métodos Eléctricos

Se tienen las siguientes dos modalidades: (a) Métodos eléctricos de superficie y (b) Sondeos eléctricos.

#### 3.4.1.- Métodos eléctricos de superficie

Son los métodos eléctricos de superficie utilizados más frecuentemente en la exploración del agua subterránea.



Los instrumentos son relativamente baratos y para los trabajos de campo sólo se necesitan dos o tres operadores.

Pueden medirse dos tipos de potencial eléctrico. Uno es el potencial eléctrico natural, o espontáneo, que existe entre dos puntos del suelo; el otro es el potencial inducido por el paso de una corriente eléctrica a través del suelo. El potencial espontáneo y la resistividad se miden usualmente con el mismo instrumental: primero se mide el potencial espontáneo y, a continuación, la resistividad.

Los potenciales espontáneos elevados son producidos por la presencia de sulfuros, por la corrosión de metales, por aguas de diferente composición química en contacto y por otros procesos electroquímicos. En algunos casos, la medida de tales potenciales permite localizar la presencia de yacimientos, fallas y zonas de metamorfización. En Geohidrología, el uso de esta técnica permite definir de forma cualitativa la distribución del terreno a poca profundidad.

Para aplicar el método, se emplean dos electrodos: uno fijo, llamado base, y otro móvil. Fijados en el terreno, se mide la diferencia de potencial entre ellos, asignando el valor obtenido al punto del terreno donde se ha ubicado el electrodo móvil. Con base en estos valores, se construyen planos de líneas equipotenciales, cuya forma y distribución permite una interpretación cualitativa de la distribución del terreno.

En cuanto a la resistividad, o resistencia específica, su unidad de medida es el ohm-metro, que corresponde a la resistividad de un conductor que, con sección de un metro cuadrado y longitud de un metro, permite pasar la intensidad de un ampere cuando se aplica en sus caras opuestas una diferencia de potencial de un volt.

Sólo son conductores los materiales metálicos y algunas de las sales. El terreno por lo tanto sería en general aislante o de resistividad muy elevada. Pero en todos los materiales del terreno existen poros saturados o no de agua, aunque con una cierta humedad. El agua, por la presencia de las sales disueltas, en proporción que depende de la temperatura, actúa como un conductor cuya resistividad oscila entre 0.5 ohm-metro (agua del mar) y 3000 ohm-metro.

La resistividad de las rocas dependerá, por lo tanto, del volumen de sus poros, de su distribución y de la resistividad del líquido que los rellena. En el granito compacto puede alcanzar valores del orden de millones de ohm-metro. En general, los minerales sólidos, tales como el cuarzo y el feldespato, son altamente resistivos, mientras que las salmueras tienen las más bajas resistividades.

Conocido el terreno y su situación respecto al nivel freático, se puede deducir su porosidad de forma aproximada y cualitativa y del mismo modo la calidad del agua que rellena los poros. A efectos geohidrológicos, una porosidad baja se manifiesta por resistividad elevada. Si la roca se encuentra sobre el nivel freático, o no contiene agua, la resistividad será elevada. Si la resistividad es muy baja, el agua almacenada tendrá un elevado contenido de sales.

#### 3.4.2.- Sondeos eléctricos

La mayoría de las técnicas eléctricas de pozo han sido desarrolladas durante los últimos cuarenta años para atender a las necesidades de la industria del petróleo. Varios de estos métodos se utilizan también en Geohidrología.

Los primeros métodos se introdujeron alrededor de 1930 y consistían en medidas del potencial espontáneo y de la resistividad eléctrica; a pesar del desarrollo que se ha alcanzado con otros métodos, continúan siendo hoy en día unos de los más útiles.

En cuanto a los registros de potencial espontáneo, son quizá los más útiles en Geohidrología. El potencial espontáneo se origina, en primer lugar en las células electroquímicas determinadas por el contacto entre las arcillas, el material permeable y el sondeo, y, en segundo lugar, como consecuencia del efecto electrocinético de los fluidos que se mueven a través de la zona permeable. De las dos causas, la primera es la fundamental en la mayoría de las formaciones. El potencial espontáneo se mide introduciendo un electrodo en el sondeo sin entubar, mientras que el otro electrodo se sumerge en un pozuelo excavado en la superficie y lleno de lodo de perforación (ver la figura 3).

El estudio del potencial espontáneo permite localizar los estratos permeables, la base y el techo exactos de las capas y estimar la calidad del agua.

Los registros de resistividad, por su parte, miden los efectos producidos por una corriente eléctrica que, generada en el camión que transporta el equipo, se transmite a la formación por medio de electrodos situados dentro del sondeo. La resistividad del sistema fluidos - roca saturada depende de 3 factores fundamentales: salinidad del fluido intersticial, porosidad de la roca y temperatura de la roca y del fluido. Otros factores a tener en cuenta son la mineralogía de los materiales sólidos y la geometría del espacio poroso. Estos registros (de resistividad) se emplean para interpretar la litología, para facilitar las correlaciones y para estimar el carácter químico del fluido intersticial.

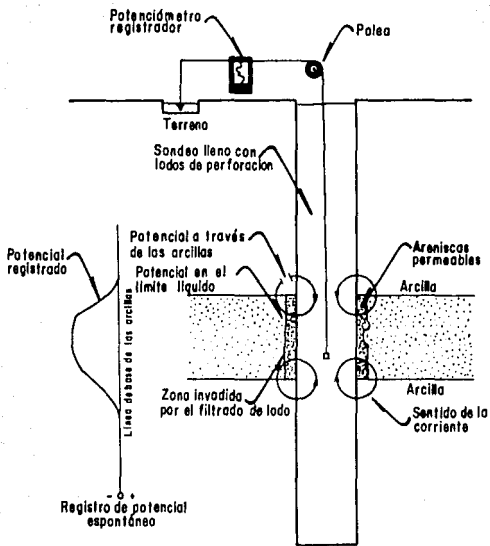


Fig. 3.- Sondeo eléctrico de potencial espontáneo

### 3.5.- Otros registros de interés en Geohidrología

El método MAGNETICO considera que, de acuerdo con su susceptibilidad magnética, los terrenos se clasifican en paramagnéticos (susceptibilidad positiva) o diamagnéticos (negativa). Su presencia modifica la distribución del campo magnético terrestre, lo que permite identificar cualitativamente su situación en el subsuelo.

Los métodos ELECTROMAGNETICOS estudian la influencia del terreno sobre un campo magnético artificial. Pueden realizarse estudios muy rápidos desde aviones. Recientemente comienza a utilizarse en estudios geohidrológicos regionales. Es un método que tiene grandes posibilidades en un futuro no lejano, especialmente para los estudios donde no es preciso alcanzar profundidades superiores a los 20 metros.

El método de CAIDA DE POTENCIAL es otro método, el cual utiliza cinco electrodos alineados. Uno, de corriente, se sitúa a distancia prácticamente infinita. Junto al otro, se sitúan tres electrodos entre los que se mide el potencial creado. Las relaciones entre las diferencias de potencial medidas permiten deducir los espesores de las capas. Es un método poco usado.

En cuanto a los sondeos, el registro GAMMA - GAMMA se utiliza para medir la densidad del material. La sonda contiene una fuente de rayos gamma y un receptor. Los rayos emitidos colisionan con los electrones de los elementos de la roca, de forma que la intensidad que alcanza el receptor (centellómetro) es tanto menor cuanto más elevada sea la densidad del terreno.

Finalmente, el registro SONICO se basa en los mismos principios y fórmulas que los métodos de prospección sísmica por refracción. Es decir, observa y mide la velocidad de las ondas longitudinales o de compresión. En el pozo se introduce una sonda provista de un emisor de ondas elásticas y un receptor de las mismas. La distancia entre

mismas. La distancia entre ambos es pequeña, por lo que se utilizan frecuencias más elevadas que en los métodos superficiales, ya que han de medirse los tiempos empleados en el recorrido con exactitud superior a la décima de milisegundo.

### 3.6.- Integración de la información geofísica a la exploración geohidrológica

A manera de resumen de este tema (exploración geofísica), la conclusión más directa es que las técnicas geofísicas ayudarán principalmente a interpretar las estructuras geológicas y a determinar la estratigrafía regional, determinando, de paso, otros parámetros importantes.

El método gravimétrico, por ejemplo, permite deducir la presencia de accidentes locales (fallas, plegamientos, intrusiones, etc.). El método sísmico por refracción ayuda a localizar zonas tectonizadas, a determinar el espesor de los depósitos aluviales, a determinar la situación de los niveles freáticos y a obtener un valor aproximado de la porosidad.

En cuanto a los registros eléctricos superficiales, el de potencial espontáneo permite definir de forma cualitativa la distribución del terreno a poca profundidad, mientras que el de resistividad ayuda a deducir la porosidad del terreno en forma aproximada y la calidad del agua que rellena los poros.

Finalmente, con relación a los sondeos eléctricos, el registro de potencial espontáneo permite localizar los estratos permeables y sus fronteras inferior y superior, al igual que la calidad del agua.

## II.4.- EXPLORACION DIRECTA

### 4.1.- Sistemas de captación de aguas subterráneas

Una captación se destina a facilitar la obtención de cierto volumen de agua para satisfacer una determinada demanda y ésta puede ser de tipo urbana, industrial o agrícola; su volumen y urgencia determinarán junto con las características geohidrológicas del lugar, el tipo de captación conveniente.

#### 4.1.1.- Pozos verticales

Quedan comprendidos aquéllos que se proyectan y construyen para obtener agua por perforación vertical de la obra de captación, por el método de percusión o el método rotatorio. La extracción del agua se realiza por medio de bombas que son accionadas por motores eléctricos o de combustión interna, situados en el exterior sobre la boca del pozo, o bien sumergidos formando un sólo cuerpo (motobombas eléctricas).

#### 4.1.2.- Pozos radiales

Este tipo de obras de captación, conocidas también como pozos de drene horizontal, se destinan a explotar acuíferos en terrenos no consolidados con espesores considerables de gravas y arenas.

La construcción de este tipo de obras sirve para incrementar el drene efectivo de un pozo vertical, hasta valores que pueden ejercer influencia real sobre la capacidad específica del pozo, como en los casos siguientes:

- En acuíferos de espesores pequeños a medios.
- En acuíferos de permeabilidad baja a moderada.
- En acuíferos libres con espesores saturados reducidos.
- En acuíferos de alta permeabilidad para obtener grandes caudales.

#### 4.1.3.- Galerías de agua

Este tipo de captaciones han tenido un marcado uso en el mundo desde hace 2700 años en Armenia.

Consisten básicamente en la construcción de un túnel que puede variar entre 2 y 3 metros de diámetro, por debajo del nivel freático, tratando de obtener una pendiente para hacer llegar el agua a un pozo para su captación o bien hacerla aparecer en un manantial artificial.

#### 4.1.4.- Manantiales

Estas captaciones de tipo natural pueden ser llevadas hasta las zonas de consumo, por medio del uso de un depósito, para después ser bombeado, o bien utilizando la fuerza de gravedad por medio de la construcción de acueductos.

### 4.2.- Métodos de perforación de pozos, galerías y drenes

#### 4.2.1.- Perforación de pozos

La perforación de pozos se lleva a cabo normalmente mediante la aplicación de esfuerzos directos sobre las rocas, tales como: impacto, presión, desgaste por abrasión, erosión o bien una combinación de estos esfuerzos. Para realizar esta perforación se utilizan dos métodos, que a continuación se describen.



#### 4.2.1.1.- Método de percusión

Con este método se realiza la perforación mediante el movimiento alternativo (bajada y subida) de una pesada masa que va fracturando la roca, desprendiendo de la misma trozos de varios tamaños que después son extraídos por medio de una cuchara de limpieza. El equipo utilizado por este método se muestra en la figura 4.

#### 4.2.1.2.- Método de percusión neumática

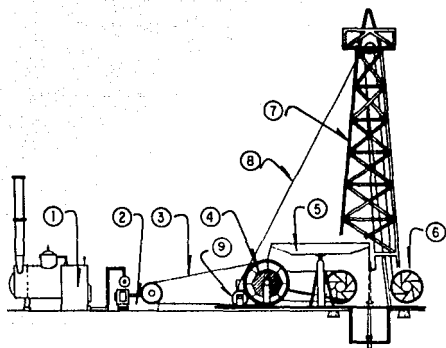
Este procedimiento de perforación consiste en el uso de un martillo con cilindro reciprocante accionado por la energía del aire, vapor o gas a presión. Este cilindro descarga su fuerza sobre una barrena proporcionándole una gran cantidad de golpes a una alta velocidad, originando que la barrena gire, por lo que puede decirse que intervienen el método de percusión y el rotatorio.

#### 4.2.1.3.- Método rotatorio

Este método es el más utilizado actualmente debido a que cada vez son mayores las profundidades en donde se encuentran los acuíferos. El equipo se muestra en la figura 5, y existen básicamente dos sistemas de perforación rotatoria:

##### 4.2.1.3.1.- Sistema directo

Se inyecta fluido de perforación a través de la tubería de perforación ascendiendo este fluido por el espacio anular entre la tubería de perforación y las paredes del pozo, extrayendo en este movimiento los recortes del fondo.



- |                         |                           |
|-------------------------|---------------------------|
| 1. _ Fuente de potencia | 5. _ Sistema de balancín  |
| 2. _ Máquina matriz     | 6. _ Tambor del cable     |
| 3. _ Trasmisión         | 7. _ Torre                |
| 4. _ Volante            | 8. _ Cable de perforación |
|                         | 9. _ Tambor auxiliar      |

Fig 4.-Equipo de perforación por el método de percusión

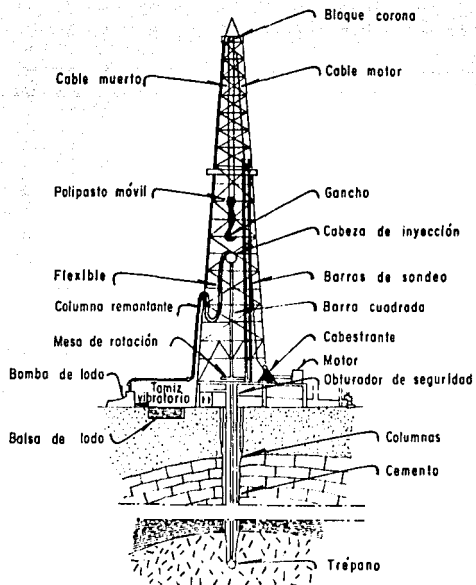


Fig 5-Esquema y principio de una instalación de perforación rotatoria

#### 4.2.1.3.2.- Sistema inverso

En este sistema, se inyecta el fluido de perforación por el espacio anular y se extrae en su movimiento ascendente por el interior de la tubería de perforación, que es de mayor diámetro que la utilizada en el sistema rotatorio directo.

Las terminaciones típicas de los pozos verticales perforados por los sistemas de percusión y rotatorio se presentan en la figura 6.

#### 4.2.2.- Método de perforación de galerías

La mayor parte de las galerías existentes en el mundo han sido construidas manualmente, incluyendo el transporte de los materiales de revestimiento.

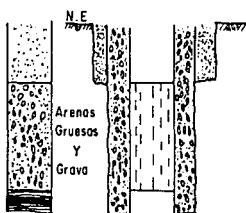
Algunas, debido a que tuvieron que construirse en basaltos, fue necesario el uso de explosivos. La utilización de la maquinaria actual de perforación de túneles a base de topes altamente mecanizados, no suele emplearse para galerías drenantes por el alto costo que esto implica. Debido a esto, en la actualidad no se construyen galerías de agua salvo en casos especiales.

#### 4.2.3.- Perforación de drenes horizontales

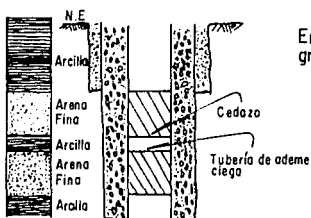
La perforación de este tipo de captaciones se distingue básicamente por dos etapas:

(a) Pozo vertical de gran diámetro (2.5 - 6 metros) con pared de concreto armado.

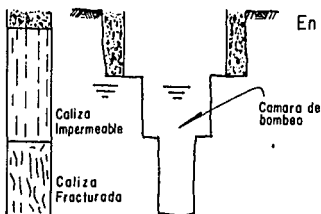
(b) Un conjunto de drenes horizontales, situados en uno o más niveles y conectados por el pozo vertical en el que desaguan a través de una válvula de compuerta (ver figura 7).



En materiales granulares



En materiales granulares finos



En calizas

Fig. 6.—Terminación típica de pozos de agua.

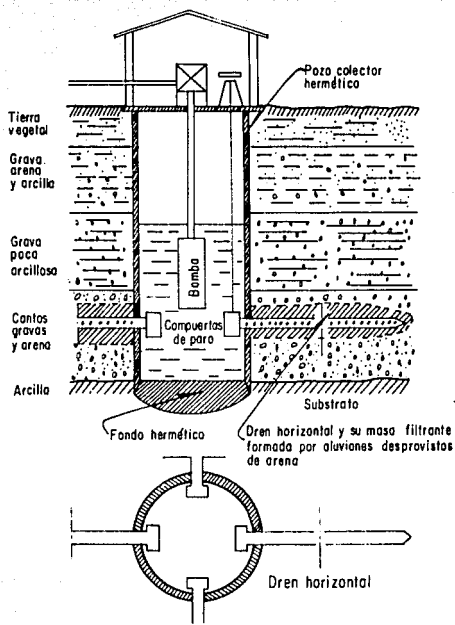


Fig 7.— Esquema tipo de pozos con drenaje radial.

La construcción de los drenes horizontales puede ser por dos sistemas. El sistema Ranney es aquel en el que las perforaciones se realizan con los mismos tubos filtrantes definitivos. Estos son de paredes gruesas y las ranuras de forma alargada. El sistema Fehlmann, por su parte, utiliza tubos de perforación de 267 mm de diámetro, que se retiran después de la colocación de los filtros, siendo éstos los más adecuados para las propiedades del agua y la granulometría del terreno.

#### 4.3.- Desarrollo de los pozos de agua

Una vez concluido un pozo, se tienen que retirar los restos de lodo y los detritos de perforación; es decir, estabilizar la formación y tratar de obtener el mayor caudal específico posible. A esta operación se le denomina desarrollo.

Estas operaciones tienen como finalidad eliminar los materiales finos de las proximidades de la pared del pozo, para que se facilite la entrada de agua al mismo. En general, los diferentes métodos tratan de conseguir una circulación rápida del agua en las inmediaciones del pozo, preferentemente entrando y saliendo, para destruir posibles puentes de arena que se forman cuando el flujo es en un sólo sentido. Se utilizan técnicas simples que pueden ser:

- (a) Valvén
- (b) Bombeo intermitente
- (c) Pistoneo
- (d) Descarga de aire comprimido

#### 4.4.- Estimulación de pozos de agua

Cuando se producen cambios en el acuífero en las inmediaciones del pozo, ya sea por métodos mecánicos o químicos,

con el fin de reducir la resistencia al flujo de forma notable, se le conoce como estimulación.

La estimulación de pozos de agua es poco frecuente por diversos motivos, entre los que resaltan los costos de las operaciones, no siendo así en los pozos petroleros, los cuales en su gran mayoría son intervenidos.

#### 4.4.1.- Estimulación por acidificación

Consiste en atacar la formación cuando está formada por carbonatos, mediante un ácido que generalmente es el clorhídrico comercial.

#### 4.4.2.- Estimulación con explosivos

Esta técnica es muy poco utilizada debido a la frecuencia de fracasos y debe aplicarse a formaciones duras fracturadas, ya que puede ser nociva en formaciones que tengan capas alternas de arcillas. Con esta técnica se incrementan las fisuras aumentando el flujo hacia el pozo. Los explosivos generalmente usados son: dinamita, gelatina explosiva, entre otros, debido a que su manejo es más seguro.

#### 4.4.3.- Fracturamiento hidráulico

Esta técnica consiste en inyectar un fluido tipo gel, con la inyección simultánea de un sustentante a altas presiones, que al aumentar las dimensiones de la fractura, este sustentante se deposita aumentando el área de flujo hacia el pozo. Esta técnica, es poco utilizada debido a los elevados costos. Su uso se limita a formaciones consolidadas.



#### 4.5.- Aforo de un pozo

Consiste en bombear agua del pozo en condiciones controladas; es decir, a un caudal constante durante ciertos intervalos de tiempo, que permiten lograr alcanzar un régimen permanente, para poder determinar el caudal de explotación óptimo de un pozo.

##### 4.5.1.- Información que se puede obtener de un aforo

- (a) Caudal óptimo o aconsejable de explotación de un pozo.
- (b) Curva característica de un pozo (gastos - abatimientos).
- (c) Una estimación de la transmisibilidad del acuífero.
- (d) En ocasiones, se puede obtener una estimación del coeficiente de almacenamiento.

## II.5.- HIDROGEOQUIMICA

### 5.1.- Química del agua del ciclo hidrológico

Como se sabe, el ciclo hidrológico es un proceso continuo en el que una partícula de agua evaporada del océano vuelve a éste después de pasar por las etapas de precipitación y escurrimiento superficial o subterráneo. A lo largo del ciclo hay múltiples ciclos menores. Dentro del ciclo hidrológico se encuentra el agua de lluvia, vehículo primario de gran importancia en el aporte de sales solubles y en comunicar agresividad al agua de filtración. La composición del agua de lluvia es muy variable, dominando el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  cerca de la costa. Hacia el interior de los continentes parece dominar el anión  $\text{SO}_4^-$  y más lentamente el ion  $\text{Ca}^{++}$ . En tanto que en el agua de mar su composición varía siendo algo más concentrada en lugares cálidos con pobre renovación, y menor en lugares semicerrados con abundantes aportaciones continentales. Los componentes principales del agua de mar son:  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Br}^-$ , como aniones; y como cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Sr}^{++}$ .

### 5.2.- Muestreo del agua subterránea

La toma de muestras del agua subterránea tiene por objeto el estudio de un acuífero o zona, el control de las variaciones temporales de composición, o bien definir ciertas características locales con vistas a su uso o algún estudio particular.

#### 5.2.1.- Métodos para la toma de muestras en pozos

La toma de muestras en pozos con bomba instalada puede hacerse a través de ésta cómodamente. Es preciso esperar el tiempo

suficiente para que el agua del pozo en las conducciones haya sido extraída. El agua bombeada procedente del acuífero es en general la mejor muestra obtenible, si la composición del acuífero es uniforme; si existe estratificación de aguas, se obtiene una mezcla.

Cuando no existe bomba, ni es posible bombear con aire comprimido, o bien cuando interesa tomar muestras a diferentes profundidades, deben utilizarse en general botellas lastradas que pueden llenarse en la profundidad deseada.

El volumen preciso de agua para un análisis de los iones y características fundamentales varía entre 1 y 2 litros, aunque con técnicas de microanálisis basta con sólo 50 cm<sup>3</sup>. Con respecto a los envases para su transporte y almacenamiento, es conveniente utilizar botellas de plástico lo más puras posible y nuevas para evitar que puedan ceder algunos iones. Para evitar los escapes de gases, en especial el CO<sub>2</sub> con la consiguiente disminución de alcalinidad y dureza, deben cerrarse bien y estar totalmente llenas. En una botella mal cerrada o a medio llenar, se pueden tener alteraciones importantes en el pH, CO<sub>2</sub>, contenido de gases, alcalinidad, dureza y calcio, y si se disuelve aire, en el contenido de hierro y magnesio.

### 5.3.- Clasificación del agua subterránea

Las diferentes clases de agua subterránea se clasifican a fin de informar de forma breve de su composición química o de algunos aspectos de la misma. Para una clasificación rápida y que no se preste a confusiones, es la utilización del diagrama triangular de Piper; el más empleado es el diagrama separado para representar los aniones y los cationes colocados de diferentes formas y con un campo romboidal central donde se presenta un tercer punto deducido de los que presentan los aniones y los cationes.

En estas gráficas se pueden presentar muchos análisis sin dar origen a confusiones.

Una clasificación amplia queda representada en el siguiente diagrama de Piper (ver figura 8).

De una clasificación simple sólo se obtiene una información global y en general se establecen con vistas a su uso doméstico, urbano, industrial o agrícola, por lo que se tiene:

(a) Por residuo seco

agua dulce (0 - 2000 ppm)  
agua salobre (hasta 5000 ppm)  
agua salada (hasta 40000 ppm)  
salmuera (hasta saturación)

(b) Por la dureza

blanda (0 - 50 ppm en  $\text{CaCO}_3$ )  
algo dura (hasta 100 ppm en  $\text{CaCO}_3$ )  
dura (hasta 200 ppm en  $\text{CaCO}_3$ )  
muy dura (hasta la saturación)

(c) Por propiedades destacadas

- Selenitosa, si tiene más de 500 ppm en  $\text{SO}_4$ .
- Ferruginosa, si tiene hierro en cantidad tal que produce un precipitado de óxido de hierro al tener contacto con el aire.
- Carbónica, si desprende burbujas de  $\text{CO}_2$  a la temperatura y presión ambientales.
- Lítica, si contiene cantidades medibles de ese elemento.

#### 5.4.- Saturación del agua subterránea

Las sales solubles que pueden ser aportadas por los diferentes tipos de rocas son descritos a continuación.

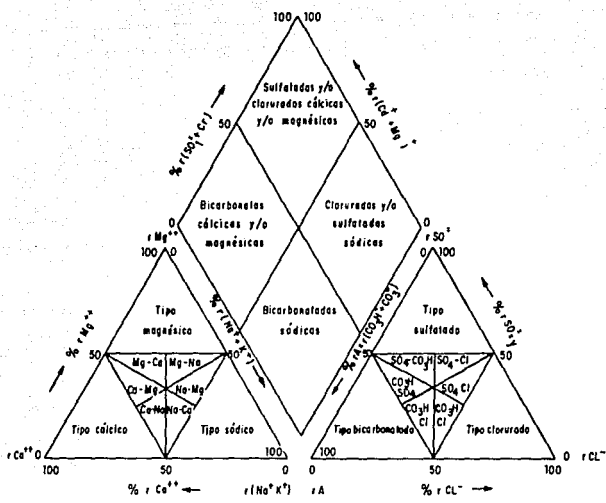


Fig 8.-Tipos de aguas deducidas de un diagrama triangular de Piper

#### 5.4.1.- Rocas ígneas

La más abundante es el granito (plutónica) y el basalto (eruptiva). Los iones tales como el sodio, calcio, magnesio y potasio están a veces débilmente retenidos por la estructura silicatada y pasan con facilidad al agua, dejando un esqueleto cristalino que opone una resistencia al progreso de esa disolución y que puede llegar a frenarla, protegiéndose así el interior de los cristales. En general, la disolución es más rápida por las aguas ácidas que por las aguas alcalinas. Las aguas relacionadas con los granitos, son en general poco salinas y en ellos domina como anión el carbonato y como cationes el sodio, el calcio o ambos. Aunque se pueden solubilizar cantidades importantes de potasio y hierro, el primero es retenido por las arcillas y el segundo es precipitado como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , por lo cual sus concentraciones finales son pequeñas. El agua relacionada con terrenos basálticos suele ser algo más salina que la de terrenos graníticos, dada la más fácil alterabilidad de los minerales constituyentes. Al igual que con el granito, se puede suponer que la mayoría del sodio, calcio y magnesio, pasan al agua mientras que el potasio es retenido y el hierro es precipitado.

#### 5.4.2.- Rocas metamórficas

Suponen una gradación entre las rocas plutónicas y las sedimentarias; por lo tanto, las aguas en contacto tendrán características intermedias, más próximas a unas o a otras según el grado de metamorfismo. Las aguas procedentes de rocas tales como esquistos, cuarcitas, mármoles y otras, suelen tener contenidos de sílice moderados. Los mármoles pueden dar aguas de tipo bicarbonatado cálcico.

#### 5.4.3.- Rocas sedimentarias

En las arenas y granos formados por material granítico, basáltico, gnéisico y carbonatado, que están parcial o totalmente cementadas con material más o menos soluble, éste puede aportar con frecuencia carbonato cálcico. Con respecto a las rocas hidrolisitas, en su formación atrapan cantidades notables de agua, que es la principal fuente de sales. Su contenido en cloruros es elevado, lo mismo que el contenido en sulfatos, sodio, calcio y magnesio; su contenido en sílice puede ser también elevado. En cuanto a las rocas evaporitas, son las formadas por evaporación de aguas y por lo tanto son fácilmente solubles. La principal roca evaporita es el yeso, seguido de la sal común. Las aguas que entran en su contacto toman grandes cantidades de sales. Las formaciones yesíferas dan concentraciones muy elevadas en sulfatos y calcio, con frecuencia también en magnesio, sodio y cloro, debido a su disolución preferente cuando el yeso contiene atrapadas sales de esos iones.

#### 5.4.4.- Principales sustancias disueltas en el agua

- (a) Aniones: ion cloruro, ion sulfato, ion bicarbonato y carbonato, ion nitrato y sílice.
- (b) Cationes: sodio, potasio, calcio, magnesio, hierro.
- (c) Gases disueltos: anhídrido carbónico y oxígeno disuelto.

#### 5.5.- Calidad del agua para los diferentes usos

La calidad de un agua queda definida por su composición y los efectos que pueden causar cada uno de los elementos que contiene, o el conjunto de todos ellos. Permiten establecer las posibilidades de su utilización, clasificando así, de acuerdo con límites estudiados, su destino para bebida, usos agrícolas, industriales, etc.

### 5.5.1.- Agua potable

Se denomina agua potable aquella que puede ser consumida por el hombre sin peligro alguno para su salud. Ello supone tener en cuenta las distintas características del agua, ya sea físicas, químicas o bacteriológicas. La Organización Mundial de la Salud (O.M.S.) adopta el criterio de dividir en tres grupos las características a tener en cuenta y que afectan la potabilidad:

(a) Características químicas y físicas.- En las tablas siguientes, se dan las concentraciones que de sobrepasarse, supondrían la impotabilidad del agua (ver las tablas 3, 4 y 5).

(b) Características bacteriológicas.- Los criterios de calidad bacteriológica del agua, se basan en la determinación de aquellos microorganismos que puedan afectar la salud del hombre o que, por su presencia, puedan señalar la posible existencia de otros.

(c) Características radioactivas.- Para las aguas de abastecimiento, se han fijado unos valores límites por debajo de los cuales se admiten para el uso público y que, en caso de que alguno de ellos sea excedido, deberán realizarse análisis radioquímicos para determinar su naturaleza antes de dictaminar acerca de la posible utilización. La máxima peligrosidad son los emisores alfa, los cuales en principio deben estar ausentes. Las cantidades máximas permisibles para la población en general en los emisores alfa más frecuentes son:

$U_{\text{natural}}$	-----	0.20	micromicrocurios	por	$\text{cm}^3$
$Th_{\text{natural}}$	-----	0.05	"	"	"
$Ra_{226}$	-----	0.01	"	"	"
$Pu_{239}$	-----	5.00	"	"	"



**SUSTANCIA****CONCENTRACION  
MAXIMA PERMITIDA (mg/l)**

Plomo	0.05
Arsénico	0.05
Selenio	0.01
Cromo	0.05
Cianuro	0.20
Cadmio	0.01
Bario	1.00
Plata	0.05

**TABLA 3.- Concentración máxima permitida**

INDICADOR	LIMITE MINIMO PARA CONSIDERAR QUE HAY CONTAMINACION (mg/l)
Demanda química de oxígeno (DQO)	10
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	6
Nitrógeno total	1
Nitrato	0.5
Carbono	0.5
Grasas	1

**TABLA 4.- Límite mínimo para considerar que hay contaminación.**

SUSTANCIA	CONCENTRACION	CONCENTRACION
	MAXIMA ACEPTABLE	MINIMA PERMITIDA
Sólidos totales	500	1500
Turbidez en SiO <sub>2</sub>	5	25
Hierro	0.3	1
Manganeso	0.1	0.5
Cobre	1	1.5
Zinc	5	15
Calcio	75	200
Magnesio	50	150
Sulfatos	200	400
Cloruros	200	600
Contaminantes orgánicos	0.2	0.5
Detergentes	0.5	1

(Valores en mg/l si no se indica lo contrario)

TABLA 5.- Sustancias químicas que afectan la potabilidad del agua.

### 5.5.2.- Uso agrícola y ganadero

El agua destinada para la bebida de los animales debe cumplir unas características bacteriológicas de potabilidad similares a las de consumo humano. De entre los elementos minerales básicos para el desarrollo de los animales, destacan la sal común, el calcio y el fósforo, y como complementarios el iodo y el fluor. En los regímenes alimentarios más amplios, se establecen balances atendiendo al contenido mineral de los mismos y que incluyen: calcio, fósforo, potasio, sodio, cloruro, azufre, magnesio, hierro, manganeso y cobre.

### 5.5.3.- Usos industriales

La diversidad de usos que el agua tiene en la industria, supone así mismo unas necesidades muy diferentes de calidad para cada uno de ellos, pero en forma general se puede establecer:

(a) Usos para procesos.- Las materias primas utilizadas, y en mayor grado la calidad del producto acabado, condicionan las características del agua a utilizar.

(b) Agresividad y poder incrustante.- La agresividad del agua se debe a su conductividad, contenido de oxígeno y aniones capaces de formar con el metal óxidos no protectores. En caso de ser químicamente pura y desgasificada, cesa la agresividad del agua y es adecuada para calderas, aunque su elevado poder de disolución puede originar algunos problemas adicionales. Algunos microorganismos contenidos en el agua producen fenómenos de corrosión; algas, bacterias de hierro y el manganeso, bacterias reductoras de los sulfatos, etc.

## 5.6.- Trazadores

Una manera directa de seguir el movimiento del agua subterránea, es añadir a la misma alguna sustancia que se pueda identificar y medir con facilidad y que al mismo tiempo sea capaz de moverse a su misma velocidad. Tal sustancia es un trazador. Estos trazadores pueden ser añadidos artificialmente, pueden provenir de acciones no controladas sobre el ciclo del agua subterránea, tales como las pruebas nucleares o la contaminación urbana, industrial o agrícola, o pueden tener un origen natural como algunos radioisótopos. Las técnicas de trazadores permiten no sólo determinar la velocidad de movimiento del agua subterránea y su dirección, sino también las porosidades, permeabilidades relativas, estudios de anisotropía y heterogeneidad de los acuíferos, mezclas de agua y velocidades de tránsito.

	1 - Trazadores sólidos en suspensión
	2 - Trazadores químicos solubles
Tipos de trazadores	3 - Trazadores químicos colorantes
	4 - Trazadores radioactivos
	5 - Trazadores isotópicos estables

### 5.6.1.- Trazadores sólidos en suspensión

Los trazadores sólidos en suspensión sólo tienen aplicación cuando el agua circula por grandes grietas como el caso de conductores kársticos muy desarrollados. Se utilizan sustancias que se mantienen más o menos fácilmente en suspensión en el agua, tales como salvado de avena, granos de almidón, levaduras, bacterias, polen coloreado, aserrín, etc. La determinación se puede realizar por simple inspección ocular o midiendo su concentración por filtración de volúmenes conocidos de la muestra y posterior pesada o volumen.

#### 5.6.2.- Trazadores químicos solubles

Los trazadores químicos solubles son aquellos que disueltos en el agua permiten identificarla fácilmente. El más utilizado es el ion cloruro, añadido como cloruro de sodio. Lo más cómodo es emplear el cloruro de sodio, pero deben utilizarse otros elementos (como el  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) cuando existe peligro de alterar la fracción arcillosa del terreno, modificando por lo tanto la permeabilidad.

#### 5.6.3.- Trazadores químicos colorantes

Este grupo de trazadores es de uso muy generalizado, por ser fácilmente solubles y detectables muchas veces en concentraciones de sólo  $10^{-3}$  ppm y en general porque las aguas naturales no la contienen. Su determinación puede hacerse con facilidad en el laboratorio con fluorómetros o fotoclorímetros. Son de empleo casi ideal en acuíferos kársticos, pero son algo deficientes en terrenos finamente fisurados o porosos de grano grueso (arenas silíceas gruesas, gravas, etc.) y poco recomendables en terrenos con un notable contenido en arcilla cuando el tiempo de permanencia es superior a unos pocos días.

#### 5.6.4.- Trazadores isotópicos estables

Son aquéllos que suponen una variación en la composición isotópica del agua o de alguna de las sustancias que tiene habitualmente disueltas, tales como el oxígeno-18 y el carbono-13. Su difícil detección, elevado costo y alteración por cambios isotópicos, reducen mucho su interés, quedando limitado al trazado natural.

## 5.7.- Contaminación

Las actividades humanas producen una gran cantidad de desechos y provocan perturbaciones en el ciclo hidrológico y en la circulación de las aguas. El resultado es con frecuencia una contaminación de las mismas, unas veces de forma depurable, pero otras veces prácticamente irreversible. Los acuíferos subterráneos, por la lenta circulación de las aguas, capacidad de absorción de los terrenos y pequeño tamaño de los canales, pueden tardar mucho en mostrar la contaminación y presentan un notable poder depurador frente a muchos agentes contaminantes, con un límite que varía según sea el agente que se considera. Los tipos de contaminantes a considerar son:

- (a) Minerales (Cl, SO<sub>4</sub> Ca, etc.)
- (b) Orgánicos degradables (excretas, purinas, etc.)
- (c) Orgánicos poco o no degradables (pesticidas, detergentes duros, hidrocarburos, etc.)
- (d) Biológicos (bacterias, algas, virus, etc.)
- (e) Radioactivos (tritio, Sr-90, Cs-137, etc.)
- (f) Gaseosos (CO<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc.).

## II.6.- CARTOGRAFIA GEOHIDROLOGICA

### 6.1.- Definición e importancia

#### 6.1.1.- Definición

La Cartografía Geohidrológica es la representación gráfica a escala de una serie de fenómenos o características del agua subterránea (unidades geohidrológicas, calidad del agua, área de los pozos, dirección del flujo del agua subterránea, rasgos hidrográficos, etc.), complementándose con la representación de vías terrestres, líneas de conducción, aeropuertos, puntos geodésicos, representación del relieve, etc. Esta representación es para una determinada zona o región; debe ser fácilmente legible.

#### 6.1.2.- Importancia

La Cartografía Geohidrológica debe su importancia al hecho de que es una herramienta útil para representar a escala apropiada las características geológicas e hidrológicas de una región o zona dada.

A nivel de estudios, permite conocer una zona de manera clara, rápida y sencilla, lo que ha obligado a que los trabajos, informes y documentos geohidrológicos, presenten una o varias cartografías. Otra importancia es que son base fundamental para el establecimiento de campañas de prospección y de trabajos complementarios para los programas de explotación y planificación de los recursos hidráulicos. Estos mapas interesan a los constructores de pozos, perforadores, arquitectos e ingenieros. A partir de estos documentos se deben resolver problemas técnicos



como implantación y ejecución de sondeos de pozos, cálculo de reservas, drenaje, etc.

## 6.2.- Presentación

La Cartografía Geohidrológica es una representación que ilustra algunos fenómenos y/o características del agua subterránea de una determinada región, zona o acuífero.

Para mejor apreciación e interpretación de una zona de estudio, el INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) recomienda usar escalas de 1 : 500,000 a 1 : 250,000; el dato principal queda representado con la asignación de la escala de colores, mientras que los datos que complementan la información principal serán de colores negros a pálidos.

Debe evitarse la sobrecarga de información, ya que dificultaría la interpretación, por lo que se maneja la opción de llevar la información complementaria a mapas y documentos anexos; a cada tipo de información complementaria le corresponderá un mapa, estos mapas podrán ser de Climatología, Hidrología de Superficie, Hidrogeoquímica, de permeabilidad o de puntos de agua o superficies piezométricas, sin olvidar poner la memoria explicativa. Cuando se trata de pocos documentos anexos, se usa a misma escala con el fin de superponerlos al documento principal. En el caso de que sea amplia la información complementaria, se usarán escalas pequeñas, quedando pequeños mapas que se colocan alrededor del principal para poder interpretarlos.

Para la escala 1 : 250,000, se usa una hoja de papel de 90 cm de largo por 63 cm de ancho, con un marco central de 84 cm de largo por 46 cm de ancho, donde se concentra la cartografía. En la parte superior del marco se deja un espacio de 4.5 cm.

En el centro irá el nombre de la zona o región de estudio y en el extremo izquierdo el nombre de quien realiza el estudio. En la parte inferior del marco se deja un espacio de 12.5 cm; en el extremo izquierdo van las unidades geohidrológicas a representar con su respectivo color, le siguen la simbología (área de veda, concentración de pozos, dirección de flujo del agua subterránea, rasgos hidrográficos, vías terrestres, aeropuertos, líneas de conducción, etc.), en seguida vienen las instrucciones para localizar un punto con una aproximación de 1000 metros, la escala que se utilizó, una referencia gráfica de la región de estudio respecto a las regiones vecinas y el logotipo de quien realiza el estudio.

### 6.3.- Clasificación de los mapas empleados en la Geohidrología

La selección y presentación de los datos a cartografiar conduce a repartir los datos cuando son demasiado numerosos en varios mapas, de aquí la necesidad de definir los tipos de mapas utilizados en la Cartografía Geohidrológica.

#### 6.3.1.- Mapas hidrogeológicos específicos

Son concebibles a gran escala. En éstos se representan la permeabilidad, capacidad de infiltración, transmisibilidad o capacidad de almacenamiento.

#### 6.3.2.- Mapas específicos del agua subterránea

Representan aisladamente uno o varios datos relativos al agua subterránea, como serían los mapas piezométricos y los mapas hidrogeoquímicos.

### 6.3.3.- Mapas hidrogeológicos generales

Representan la litología de los afloramientos y sus características estructurales sin perder el equilibrio entre datos geológicos y los relativos al agua subterránea.

### 6.3.4.- Mapas hidrogeoquímicos

Representan conjuntamente la concentración y la naturaleza química del agua.

### 6.3.5.- Mapas hidrogeoquímicos específicos

Suelen representar los caracteres químicos secundarios, la concentración en ciertas sales o iones, la dureza, etc.

### 6.3.6.- Mapas de recursos de agua subterránea

Proporcionan indicaciones sobre las cantidades de agua subterránea disponible (explotabilidad instantánea y disponibilidad en aguas subterráneas), entendiéndose por explotación instantánea de un acuífero al suministro instantáneo máximo que se puede extraer en cada obra de captación; y por disponibilidad en agua subterránea, la cantidad de agua previsible considerada globalmente y a largo plazo, de un acuífero y un área determinada, expresada en caudal ficticio, instantáneo o anual, por unidad de superficie.

## 6.4.- Forma de realizar las cartas geohidrológicas

Este trabajo se realiza conjugando un trabajo de equipo que comprende: la Fotografía Aérea, que se encarga de obtener las

fotografías del suelo; la Topografía, que se encarga de medir distancias, niveles, pendientes, accidentes del terreno, así como las obras hechas por el hombre; la Geología determina los tipos de roca, y, junto con el hidrólogo, a partir de estudios previos, determinan la disponibilidad del agua subterránea, tanto en sus límites, direcciones de flujo, etc., como en la delimitación de las zonas de salida y recarga.

Todo este trabajo se conjuga en el departamento de Cartografía, donde se cuenta con avanzados equipos fotogramétricos. Finalmente, se obtiene lo que se conoce como una cartografía geohidrológica.

#### 6.4.1.- Escala y selección de datos

Es evidente que la elección de la escala condiciona los datos a representar y su manera de exponerlos. Las pequeñas escalas están reservadas a finalidades científicas y las escalas mayores están particularmente adaptadas a fines prácticos y técnicos. Las escalas estarán en función del fondo topográfico y de la cantidad de datos a cartografiar. Una escala apropiada proporciona legibilidad y rapidez a la interpretación.

#### 6.4.2.- Simbología

En la figura 9 se presentan los símbolos más comunes en la mayoría de las cartografías geohidrológicas. Estos símbolos pueden sufrir modificaciones de color o de forma, según la conveniencia de quien realice el estudio.













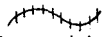


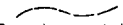



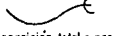















Climatología (se representan con colores a discreción del autor)	 Altura o profundidad de las superficies piezométricas (violeta)	 Depósito de acumulación de agua de superficie (rojo)	 Arenisca
 Dirección y buzamiento (negro)	 Dirección de la capa acuífera (violeta)	 Presa subterránea	 Conglomerado
 Eje anticlinal, indicando su buzamiento (color negro)	 Línea divisoria de las aguas subterráneas (violeta)	 Canal de irrigación	 Arenisca con conglomerado
 Falla con dirección de labio hundido (negro)	 Barrera en la formación acuífera	 Canal de drenaje	 Calizas
 Curso de agua estacional (azul)	 Curso de agua salada (Línea azul con borde naranja)	 Caliza karstificada	 Dolomía
 Desaparición total o parcial de un curso de agua (azul)	 Lago salado (Línea con borde naranja en el interior)	 Zona de fracturas donde se puede extraer agua	 Rocas intrusivas
 Terreno inundado (azul)	 Pozo perforado (rojo)	 Gravas	 Rocas metamórficas
 Fuente (azul)	 Estación de bombeo de agua subterránea	 Arenas	 Pozo
 Lago (azul)	 Deposito subterráneo (rojo)	 Arenas y gravas	 Manantial

Fig 9.—Simbología de la cartografía geohidrológica

#### 6.5.- Uso de la Cartografía Geohidrológica en la exploración del agua subterránea

La Cartografía apoya a la Petrografía, Estratigrafía, Geología Estructural y Geomorfología, en la definición de la forma general de la zona estudiada. Generalmente, se sigue el siguiente procedimiento:

De un plano geológico que muestre los diferentes tipos de roca que afloran en la superficie y sus explicaciones anexas, se seleccionan las probables rocas conductoras de agua y en dónde se encuentran (la grava, la arena, las areniscas y las calizas son las mejores conductoras de agua; sin embargo, sólo constituyen una parte de las rocas que forman la corteza terrestre; las rocas constituidas por arcilla, lutitas y rocas cristalinas, son conductoras pobres).

Después, debe reunirse información de los pozos: su localización, profundidad de perforación, profundidad al nivel del agua, caudal promedio, y el tipo de rocas que se hayan encontrado al perforar.

Por último, conseguir la historia de los pozos es de gran utilidad para conocer las condiciones geohidrológicas de la región de estudio.

En conclusión, la Cartografía ilustra los lugares donde puede encontrarse el agua subterránea, las rocas que la contienen y los lugares de recarga y descarga de los acuíferos.

**CAPITULO III**

**" EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS SUBTERRÁNEOS "**

### III.1.- INTRODUCCION

Una vez determinada la existencia y localización de agua subterránea, es preciso saber qué volumen es el que está almacenado, para lo cual existen varios métodos.

Uno de ellos lo representa el balance hidrológico; a grosso modo, la suma de las entradas menos la suma de las salidas de agua del acuífero es la diferencia del almacenamiento, que se tiene para un cierto período de tiempo. Para efectuar el balance se requiere determinar entre otras cosas: los volúmenes de extracción de agua subterránea y los escurridos mediante manantiales y ríos (actividades de campo), así como los volúmenes precipitados, volúmenes infiltrados y los evapotranspirados (actividades de gabinete).

Otro método, en el cual se consideran más directamente las características del acuífero o acuíferos estudiados, es mediante la realización de pruebas de bombeo, con las cuales se obtienen datos tales como la permeabilidad, coeficiente de almacenamiento y transmisibilidad. Finalmente, la elaboración de una red de flujo también es una eficiente herramienta en la evaluación del volumen almacenado. Para esto se requiere de un plano topográfico superficial del lugar y de la profundidad del nivel del agua en varios pozos; mediante esta red de flujo es posible determinar la permeabilidad, la transmisibilidad y la dirección del flujo del agua.



### III.2.- ACTIVIDADES DE CAMPO

#### 2.1.- Inventario de las obras de captación y aforo

Este inventario se refiere a las técnicas de recopilación, codificación y análisis de los datos hidrogeológicos que se obtienen a partir de obras ya construidas. Estos datos son proporcionados por los usuarios de dichas obras, o tomados directamente si las obras están ya abandonadas. Los datos a que se hace referencia son: perfil litológico de la perforación u obra de captación, posición del nivel piezométrico o freático, características químicas del agua extraída, volúmenes de agua utilizada por unidad de tiempo y algunos otros más.

Un inventario es quizá el sistema más idóneo para empezar a conocer rápidamente las características hidrogeológicas de una zona dada (por lo menos en las primeras etapas del estudio), sin necesidad de recurrir a reconocimientos de tipo directo (pozos, sondeos, piezómetros) cuyo costo es más elevado.

Los datos recopilados en un inventario, deben situarse geográficamente en mapas apropiados, mencionando, por otra parte el nombre y la dirección completa del propietario, uso que se da al agua, potencia instalada (si se tiene un sistema mecánico de elevación), etc. Por lo tanto, es necesario disponer los datos en una serie de impresos tipo, debidamente estudiados y que faciliten su reproducción y difusión en los centros y organismos que deban utilizarlos.

Se tienen dos maneras de realizar un inventario:

- (a) En forma directa , recorriendo la zona estudiada procurando rellenar, de cada punto de agua, los datos pedidos en la ficha .
- (b) Indirectamente, es decir, acudiendo a todas las personas, entidades públicas o privadas que por la índole de su trabajo

puedan indicar la existencia de puntos de agua en la zona que se considera. Posteriormente, una vez sabido que en un lugar existe una obra de captación o aforo, mediante un traslado a la misma, se puede obtener el resto de la información buscada.

Con los datos de un inventario realizado en una zona específica se puede determinar: la explotación total de la zona, distribución en el espacio de los puntos de agua, una estimación de la transmisibilidad del acuífero, conocimiento de la geología del subsuelo, la evolución histórica de los caudales, niveles piezométricos y características químicas del agua y finalmente se consigue un archivo de datos de gran utilidad para estudios futuros.

## 2.2.- Selección de pozos de observación

La instalación de piezómetros para medir los niveles de agua subterránea es, en general, muy costosa y por ello se trata de aprovechar los pozos y sondeos ya existentes como puntos de medición ; ello requiere un inventario previo y la consecución de los permisos de uso correspondientes.

Para evitar sorpresas y pérdidas de tiempo es preciso conocer el esquema geológico y constructivo aproximado de los puntos de agua en que se vaya a medir el nivel, para asegurar que corresponden al acuífero estudiado.

Debe ser factible medir con facilidad el nivel del agua y se necesita además que el pozo de observación esté limpio; si es preciso, se deberá efectuar una limpieza.

De gran importancia es la adecuada ubicación de los pozos de observación con respecto al de bombeo. En términos generales, el emplazamiento de los pozos de observación a distancias entre 30 y 100 m. del pozo de bombeo, es adecuado en la mayoría de los casos; aunque para la ubicación más cuidadosa deben contemplarse

los siguientes aspectos: el tipo y la transmisibilidad del acuífero y el caudal de descarga .

En acuíferos confinados, la propagación de los efectos del bombeo es muy rápido y, por tanto, los abatimientos pueden ser medibles a distancias hasta de varios cientos de metros , incluso para tiempos cortos de bombeo. Por esta razón, en este tipo de acuíferos, los pozos de observación pueden situarse bastante alejados del pozo de prueba. En cambio, en los acuíferos freáticos la propagación de los abatimientos es mucho más lenta; por consiguiente, los pozos de observación deberán situarse más próximos al de bombeo, a fin de que los abatimientos sean medibles sin prolongar demasiado el bombeo. Mientras mayor es la transmisibilidad del acuífero , más extenso el cono de abatimiento entonces en un acuífero de alta transmisibilidad, los pozos de observación pueden situarse más alejados del pozo de bombeo, que en un acuífero de transmisibilidad baja. La magnitud de los abatimientos es directamente proporcional al caudal bombeado. Por lo tanto, mientras más bajo sea el caudal extraído, más próximos deben situarse los pozos de observación.

### 2.3.- Obtención de profundidades al nivel del agua en los pozos de observación

Para construir las superficies piezométricas o para conocer los descensos en una prueba de bombeo, es preciso disponer de instrumentos adecuados a tales medidas. Existen fundamentalmente dos tipos de sistemas diferentes de estos instrumentos:

- (a) Los sistemas manuales, que precisan repetir la operación cada vez que se ha de realizar una lectura.
- (b) Los sistemas automáticos, en los cuales el observador sólo tiene que leer en una carátula cierta profundidad existente hasta el agua. De estos últimos se tienen los limnímetros y los limnógrafos.

### 2.3.1.- Sistemas manuales eléctricos

En este tipo de medidores es preciso la utilización de la energía eléctrica para su funcionamiento y se basan en la observación del momento en el que se cierra un circuito eléctrico mediante un elemento detector ( Fig.10 ). La determinación de la profundidad al nivel del agua se hace midiendo la longitud del cable introducido en la perforación.

### 2.3.2.- Sistemas manuales acústicos

Se basan en la auscultación del ruido producido por la sonda o elemento que se introduce en el agua al chocar con la misma; pueden ser de distintos tipos. Como en el caso anterior, la determinación de la profundidad del nivel piezométrico se hace midiendo la longitud del cable o cuerda introducido en la perforación. Generalmente el ruido se produce al ser expulsado el aire que se encuentra en un tubo invertido y cerrado por el extremo superior, en el cual se ha practicado una pequeña ranura a modo de embocadura de flauta.

Al sumergirlo, el agua penetra en el tubo por su extremo inferior, el aire se comprime y se ve obligado a salir por la ranura, originando un silbido característico ( Fig.11 ). Para mayor exactitud, ya que el tubo posee unos 40 cm de longitud, este tubo metálico puede llevar adosados por fuera una serie de cazoletas distribuidas regularmente, cuya misión consiste en poder sumar a la longitud medida la equivalente al número de cazoletas vacías. El ruido del mecanismo de bombeo en marcha hace inútiles estos dispositivos acústicos.

### 2.3.3.- Sistemas automáticos no inscriptores o limnímetros

Se basan en el aprovechamiento de la energía producida por el movimiento vertical de ascenso y descenso del nivel del agua en la perforación para mover un conjunto formado por un flotador, que

oscila juntamente con el agua ( situado por encima de la misma ) y un contrapeso, unidos por un mismo cable, transmitiéndose este movimiento por un sistema de polea y engranaje a una carátula donde se lee directamente la profundidad hasta el nivel del agua ( Fig.12 ).

#### 2.3.4.- Sistemas automáticos inscriptores o limnigrafos

Los medidores limnimétricos de flotador pueden ir complementados con un sistema inscriptor a base de un tambor giratorio en el que se grafiquen las variaciones del nivel piezométrico o freático observadas por el aparato, hablándose entonces de limnigrafos. Se debe contar con una fuente de energía tal como un pequeño sistema de relojería o un motor eléctrico a base de pilas, para que accione al tambor giratorio, en el que se inscriben las variaciones del nivel del agua por medio de una plumilla.

#### 2.4.- Determinación de los volúmenes de extracción de agua subterránea.

El volumen de extracción de agua subterránea más significativo, lo constituyen las extracciones mediante pozos de bombeo. La determinación de dicho volumen se hace con base en un censo de pozo, seleccionándose de él, los aprovechamientos que por las características de su equipo de bombeo y/o su régimen de operación, tengan una influencia significativa en el volumen total. Según el uso o usos a que se destinen los pozos seleccionados, se elegirá la forma más conveniente de estimar sus volúmenes de extracción. Entre los métodos que pueden utilizarse se tienen:

- a) Medidor totalizador de flujo
- b) Consumo de energía eléctrica y caudal
- c) Reloj horario de trabajo del motor y caudal
- d) Tarjetas anotando arranque y paro por parte del bombero y caudal

- e) Superficie y lámina de riego
- f) Agrupando los pozos por medio de descarga y uso

Como se puede notar, el dato importante en la hidrometría de los aprovechamientos que cuentan con equipos de bombeo, es la determinación del caudal que extraen, el cual se puede conocer mediante el aforo de los pozos. Los métodos más utilizados en el campo son: el método del orificio y el método de la escuadra.

#### 2.4.1.- Método del orificio

En este método el caudal se calcula a base de medir la carga hidrostática o de presión leída mediante un piezómetro colocado sobre un costado del tubo de descarga, aguas arriba del orificio.

El aparato consta de un conducto o tubo de descarga de una longitud de por lo menos 6 pies, en el cual se efectúa una perforación a 2 pies antes de la salida, para colocar un tubo corto de 1/8 de pulgada de diámetro. Todas las rebabas producto de la perforación se eliminan cuidadosamente por el interior del tubo de descarga. El tubo corto sirve para colocar el piezómetro y se atornilla en la perforación efectuada, cuidando que esté al raz de la pared interior del tubo de descarga (Fig.13 ).

El tubo piezométrico consta de una manguera de hule transparente de aproximadamente 4 o 5 pies de longitud y 1/8 de pulgada de diámetro que se coloca en el tubo corto antes mencionado. El nivel del agua en el piezómetro se mantiene visible en la manguera, y sus fluctuaciones se leen en la escala vertical que se coloca a un lado de la manguera. la carga hidrostática en el orificio será la distancia vertical que haya entre el nivel del agua en el tubo piezométrico y el plano horizontal que pasa por el centro de la abertura del orificio.

Mediante una tabla de equivalencias, la carga piezométrica medida en pulgadas, se convierte en galones por minuto o en litros por segundo.

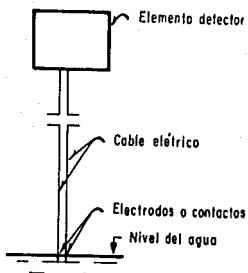


Fig 10.-Sistema manual eléctrico

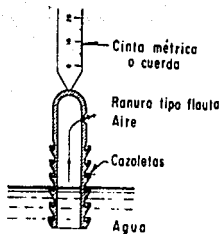
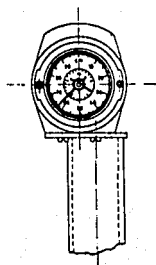


Fig 11.-Sistema manual acústico

VISTA FRONTAL



VISTA POSTERIOR Y DETALLE

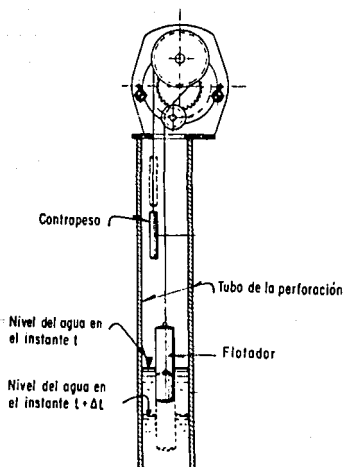


Fig 12.- Limnómetro

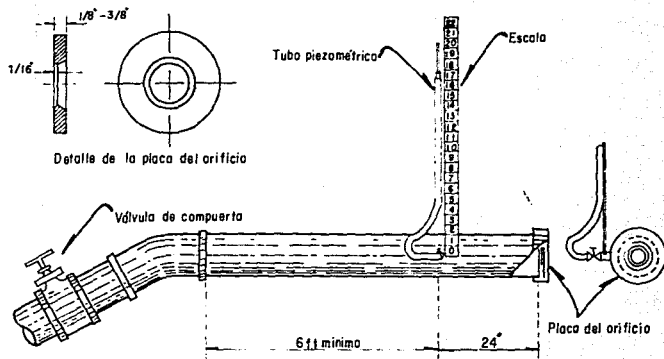


Fig. 13: Método del orificio.



#### 2.4.2.- Método de la escuadra

Este método es sumamente rápido y práctico para el aforo de pozos con un tubo de descarga horizontal y que puede estar trabajando parcial o totalmente lleno. El método consiste en colocar una escuadra de carpintero o regla plegadiza en el tubo de descarga, como se muestra en la figura 14. La escuadra o regla se colocará de tal manera que el valor de H sea de 15 cm tomándose entonces las lecturas de A y D (y de Z si el tubo de descarga está parcialmente lleno).

Para la determinación del caudal de los pozos, se han elaborado tablas que cubren un alto rango de valores; sin embargo, la forma más fácil de obtenerlo, es mediante el uso del monograma que se presenta en la figura 14, donde además se presenta un ejemplo.

#### 2.5.- Aforo de manantiales y corrientes superficiales

Generalmente hablando, se cuenta con tres tipos de aforos en cursos de agua superficial:

- a) Aforos indirectos
- b) Aforos con molinete
- c) Aforos químicos

##### 2.5.1.- Aforos indirectos

Algunas veces, las estaciones de aforo buscan la medida de alguna variable auxiliar cuyo conocimiento conduzca a través de una función intermedia, al conocimiento del caudal. La variable auxiliar idónea es el valor de h o nivel variable de las aguas y la función intermedia llamada curva o tabla de gastos  $Q = f(h)$ , también llamada frecuentemente curva de tarado. Así, cada valor instantáneo de h dará a conocer el valor del caudal Q en el mismo instante.

## NOMOGRAMA PARA CALCULAR EL GASTO A TRAVES DE UN TUBO

FORMULA RESULTA

$$Q = 0.0174 \frac{A D^2}{\sqrt{H}}$$

D, H, A, en cm  
Q en lit/seg

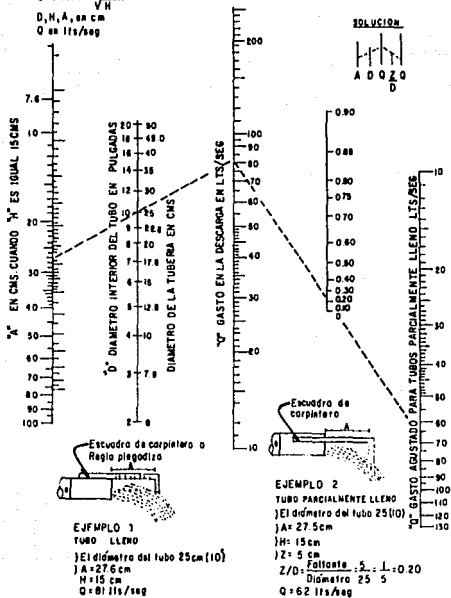


Fig. 14- Método de la escuadra.

El limnigrama es la curva que registra en cada instante el valor del nivel o altura de la corriente, o sea la gráfica representativa del trabajo útil del limnógrafo. Esta gráfica se da en coordenadas cartesianas, siendo normalmente las abscisas para los tiempos y las ordenadas para las lecturas legibles en la escala anexa.

Las curvas  $h = f(t)$  del limnigrama, no tienen significación inmediata respecto a los caudales  $Q$  del curso de agua, si no se hace entrar en juego la tabla de gastos  $Q = f(h)$  por puntos, puede dibujarse en el mismo limnigrama la curva  $Q=f(t)$ , llamada habitualmente hidrograma. Una vez que sobre el limnigrama, o en otra parte, se ha dibujado el hidrograma es fácil deducir los caudales medios diarios.

Todos los limnógrafos se fundamentan en dibujar sobre el limnigrama los puntos definidos por dos variables. La variable tiempo, se cuantifica siempre por un reloj que marca por lo menos con claridad los intervalos de una hora. La variable altura de nivel del agua, es materializada con movimientos cuyo par motor tiene que ser la oscilación del nivel del agua.

#### 2.5.2.- Aforos con molinete

Para medir el caudal de una corriente de forma directa, se utilizan los llamados " Molinetes Hidráulicos ", los cuales se destinan para medir mecánicamente la velocidad de la corriente de agua en la que están sumergidos.

El fundamento que utilizan los molinetes para el cumplimiento de su función es que el movimiento de la corriente haga girar un eje a través de una hélice. La velocidad de giro de una hélice se mide por medio de un sistema de platinos que cierran un contacto por cada revolución del eje. La señal se emite a la superficie y hace sonar un timbre; los golpes del timbre se pueden contrastar fácilmente con un cronómetro, de forma que se llega a conocer con suficiente exactitud el valor de la velocidad angular.

Finalmente el valor del gasto se obtiene multiplicando la velocidad por el área transversal al flujo, en unidades consistentes.

### 2.5.3.- Aforos químicos

Estos aforos se basan en la variación de concentración que experimenta una disolución al ser vertida sobre el cauce de una corriente superficial en la cual circula un caudal  $Q$ , que es el que se trata de determinar.

En la práctica de estos aforos, es conveniente utilizar en disolución cuerpos que no exista probabilidad alguna de vestigio previo en la corriente, lo cual hace descartar el empleo de cloruro de sodio, que fue por su economía el que en principio era utilizado. Es frecuente el uso de dicromato de sodio. También existen trazadores radioactivos, que emplean radioisótopos de vida corta.

### 2.6.- Selección de pozos para pruebas de bombeo y su ejecución

Habiendo disponibilidad presupuestal para construir pozos con este fin, la prueba puede llevarse a cabo en el sitio que más convenga, aunque lo más frecuente es que tengan que utilizarse pozos ya existentes.

Si en el área de interés hay varios pozos utilizables para el propósito de que se trata, en la elección del más adecuado deben considerarse los aspectos siguientes:

- El equipo de bombeo se encuentre en condiciones apropiadas para sostener el caudal durante la prueba,
- La profundidad al nivel del agua sea fácilmente medible ,
- El caudal de extracción puede ser fácilmente aforado,
- Que el agua bombeada no se infiltre hasta el acuífero en las proximidades del pozo,
- Las características constructivas y el corte geológico del pozo

- sean conocidos, y
- Los pozos próximos no operen durante la prueba.

#### 2.6.1.- Ejecución de la prueba

Antes de iniciar la prueba, se revisará el equipo a utilizar (cronómetros, sondas, cintas métricas, escuadra para aforo, etc.), para verificar su correcto funcionamiento. El cable de las sondas deberá ser previamente calibrado. Cuando se cuente con varias sondas, se procurará, en lo posible, que todas las observaciones en un pozo se efectúen con la misma sonda. Seguidamente, se llevarán a cabo las actividades siguientes:

a) Inmediatamente antes de iniciar el bombeo, se medirá la profundidad al nivel estático en el pozo de bombeo y en el o los pozos de observación. Se anotará la hora de iniciación de la prueba y las lecturas iniciales y finales con el nombre de los pozos a que corresponden.

b) Se iniciará el bombeo, procurando mantener el caudal constante y se procederá a medir la profundidad al nivel del agua en el pozo de bombeo y en el o los de observación, con una secuela de tiempo previamente definida.

c) Con las observaciones realizadas, se construirá, en el sitio de prueba, la gráfica de variación del nivel dinámico con el tiempo, para el pozo de bombeo y para cada uno de los pozos de observación. Estas gráficas, constituyen un elemento de juicio para continuar o suspender la prueba.

d) Una vez concluida la etapa de bombeo, se iniciará la de recuperación, en la que se efectuarán observaciones en los tiempos previamente definidos.

### III.3.- ACTIVIDADES DE GABINETE

#### 3.1.- Determinación de volúmenes de precipitación

La precipitación es el agua que recibe la superficie terrestre en cualquier estado físico proveniente de la atmósfera. En términos generales, la precipitación de acuerdo a su origen puede ser precipitación por convección: originada por el levantamiento de masas de aire ligero cálido al encontrarse masas de aire densas y frías, precipitación orográficas: se origina por el levantamiento del aire producido por las barreras montañosas; precipitación ciclónica: asociada al paso de ciclones.

La precipitación se mide en términos de la altura de agua y se expresa en milímetros; los aparatos utilizados en su medición son: pluviómetros y pluviógrafos de registro directo en cinta magnética.

#### 3.1.1.- Métodos para obtener los volúmenes de precipitación

En muchos problemas hidrológicos se requieren conocer la altura de precipitación media en una zona, ya sea durante una tormenta, una época del año o un período determinado de tiempo, para hacerlo se tienen tres criterios o métodos: promedio aritmético, método de Thiessen y método de isoyetas, los cuales determinan los volúmenes de precipitación.

A partir del siguiente ejemplo se puede determinar la altura de la precipitación media en la cuenca de los ríos Papagayo y Omitlán, Gro; para una tormenta que duró 24 horas, se tienen las siguientes estaciones:

Nombre de la estación	Altura de la lluvia registrada (mm)
Chilpancingo	43
San Vicente	53
Sta. Barbara	54
Llano Grande	64
Estocama	102
Parota	144

Tabla 6.- Estaciones hidrológicas (aplicando los tres criterios anteriores)

### 3.1.1.1.- Promedio aritmético

Para calcular la altura de precipitación media en una zona empleando el promedio aritmético, se suma la altura de lluvia registrada en un cierto tiempo, para cada una de las estaciones localizadas dentro de la zona y se divide entre el número total de estaciones. La precisión de este criterio depende de la cantidad de estaciones disponibles, de la forma como están localizadas y de la distribución de la lluvia estudiada. Es el criterio más impreciso, pero es el único que no requiere del conocimiento de la localización de las estaciones en la zona de estudio.

$$hpm = \frac{43 + 53 + 54 + 64 + 102 + 144}{6} = 76.7 \text{ mm}$$

### 3.1.1.2.- Método de Thiessen

En este criterio es necesario conocer la localización de las estaciones en la zona de estudio, ya que para su aplicación se requiere delimitar la zona de influencia de cada estación dentro del conjunto.

Para determinarla primero se trazan triángulos que

# ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

parten de un punto común (estación ubicada aproximadamente a la mitad de la zona de influencia, figura 15) a continuación se trazan líneas bisectoras perpendiculares a los lados de los triángulos, los cuales forman una serie de polígonos cada uno de ellos contiene una estación.

La altura de precipitación media es:

$$hpm = \frac{\sum_{i=1}^n hpi \cdot Ai}{A} = \sum_{i=1}^n hpi \frac{Ai}{A} \dots\dots\dots \text{ecuación (1)}$$

donde:

- A - área de la zona ( Km<sup>2</sup> )
- Ai - área tributaria de la estación i ( Km<sup>2</sup> )
- hpi - altura de precipitación registrada en la estación i ( mm )
- hpm - altura de precipitación media en la zona de estudio ( mm )
- n - número de estaciones localizadas dentro de la zona

Para aplicar el método de Thiessen se elaboró la siguiente tabla:

Estación	Altura de precipitación ( hpi ) (mm)	Area polígono Thiessen ( km <sup>2</sup> ) ( Ai )	hpi * Ai
Sta. Barbara	54	1 244	67 176
San Vicente	53	837	44 361
Chilpancingo	43	995	42 785
Llano grande	64	1 888	120 832
Estocama	102	1 494	152 388
Parota	144	887	127 728
Suma		7 345	555 270

Tabla 7.- Aplicación del método de Thiessen



A partir de los valores de la tabla y utilizando la ecuación 1 se obtiene:

$$hpm = \frac{555\ 270}{7\ 345} = 75.6 \text{ mm}$$

### 3.1.1.3.- Método de Isoyetas

Para emplear este criterio se necesita un plano de isoyetas de la precipitación registrada en las diversas estaciones de la zona de estudio. Las isoyetas son curvas que unen puntos de igual precipitación ( Fig.16 ).

Este método es el más exacto pero requiere de un cierto criterio para trazar el plano de isoyetas, se puede decir que si la precipitación es de tipo orográfico, las isoyetas tenderán a seguir una configuración parecida a las curvas de nivel.

Por supuesto entre mayor sea el número de estaciones dentro de la zona de estudio, mayor será la aproximación con la cual se trace el plano de isoyetas. Para calcular la altura de precipitación media se usa la ecuación 1, pero en este caso  $A_i$  corresponde al área entre isoyetas,  $h_{pi}$  es la altura de la precipitación media entre dos isoyetas y  $n$  es el número de tramos entre isoyetas.

Para aplicar el método de isoyetas se elaboró la siguiente tabla:

Altura de lluvia registrada , en mm

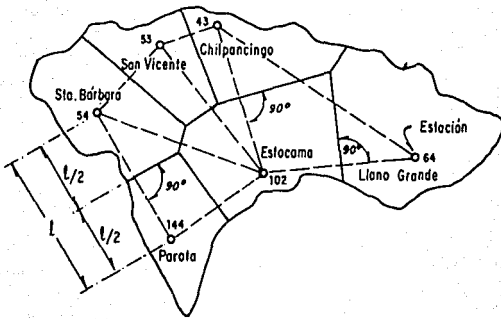


Fig 15.- Polígonos de Thiessen

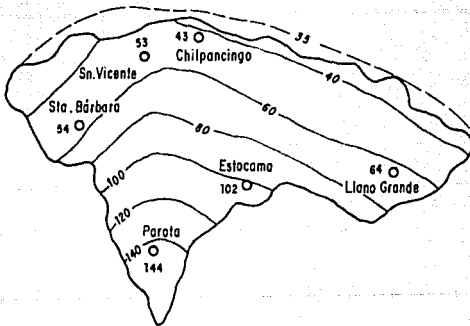


Fig 16.-Plano de Isoyetas  
( Cuencas de los ríos Papagayo y Omitlan , Gro.)

Isoyetas	Altura de precipitación ( hpi ) en ( mm )	Area entre isoyetas ( A <sub>i</sub> ) en ( km <sup>2</sup> )	A <sub>i</sub> * hpi
160 - 140	150	335	50 250
140 - 120	130	397	51 610
120 - 100	110	602	66 220
100 - 80	90	1 142	102 780
80 - 60	70	1 667	116 690
60 - 40	50	2 403	120 150
40 - 35	37.5	799	29 963
Suma		7 345	537 663

Tabla 8.- Aplicación del método de isoyetas

Sustituyendo los valores obtenidos de la tabla en la ecuación 1, se obtiene :

$$hpm = \frac{537\ 663}{7\ 345} = 73.2\ \text{mm}$$

### 3.2.- Determinación de volúmenes escurridos superficiales

#### 3.2.1.- Fuentes de escurrimiento

El escurrimiento es la parte de la precipitación drenada por las corrientes hasta su salida. Esta agua que fluye por las corrientes proviene de diversas fuentes y en base a ellas se considera el escurrimiento como superficial o subterráneo.

El superficial es aquel que proviene de la precipitación no infiltrada y que escurre sobre la superficie del suelo y la red de drenaje hasta su salida. Se puede decir que su efecto sobre el escurrimiento total es directo y sólo existirá durante una tormenta e inmediatamente después de que esta cese.

La parte de la precipitación que contribuye al escurrimiento superficial se denomina precipitación en exceso.

El escurrimiento subsuperficial se debe a la precipitación infiltrada en la superficie del suelo, pero que se mueve lateralmente sobre el horizonte del mismo. Esto puede ocurrir cuando exista un estrato impermeable paralelo a la superficie del suelo; su efecto puede ser inmediato o retardado dependiendo de las características del suelo.

En el escurrimiento subsuperficial o subterráneo, el agua subterránea es recargada por la parte de la precipitación que se infiltra en el suelo una vez que éste se ha saturado.

### 3.2.2.- Ciclo del escurrimiento

El ciclo del escurrimiento indica las diferentes fases entre la precipitación y el escurrimiento total. En la figura 17 se muestra dicho ciclo. El escurrimiento total puede considerarse compuesto por los escurrimientos directo y base, este último proviene del agua subterránea y el directo es originado por el escurrimiento superficial. Este ciclo tiene como finalidad distinguir la participación de cada escurrimiento respecto al escurrimiento total.

### 3.2.3.- Hidrograma

La relación lluvia-escurrimiento queda reducido en la figura 18, se considera a la cuenca como un sistema cuyas entradas y salidas son los registros simultáneos de precipitaciones y escurrimientos, que al evaluarlos para un período de tiempo, dan lugar al hidrograma.

Un hidrograma es la representación gráfica del escurrimiento (caudal vs tiempo) de una cuenca o río medido en una estación de aforo a través de varios puntos en una zona de influencia. El caudal representado en el hidrograma esta compuesto por tres elementos que repercuten en el ciclo hidrológico:

- a) El escurrimiento directo o superficial, que es el que fluye sobre la superficie del terreno.
- b) El interflujo, que es el agua que fluye parcialmente en forma subterránea pero que no constituye parte del cuerpo principal del agua subterránea.
- c) El flujo base, el cual es una descarga natural del agua subterránea que sale del acuífero para incorporarse al cauce del río y es lo que drena al cauce del río en el estiaje.

### 3.3.- Determinación de los parámetros infiltración y evapotranspiración

#### 3.3.1.- Infiltración

El análisis de este componente del ciclo hidrológico es de importancia básica en la relación entre la precipitación y el escurrimiento. La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en los estratos de la superficie del suelo y se mueve hacia el manto freático. El agua primero satisface la diferencia de humedad del suelo y después cualquier exceso pasa a formar parte del agua subterránea.

##### 3.3.1.1.- Factores que afectan la capacidad de infiltración

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

Otro grupo de factores que afectan a la infiltración aunque en grado menor, son aquellos que modifican las características físicas del agua. Uno de los cambios más importantes es su contaminación, que en la mayoría de los suelos ocurre en menor o mayor escala debido a las arcillas finas y coloidales. Esto afecta en forma directa a la infiltración, ya

que el material en suspensión que lleva el agua infiltrada bloquea los poros del suelo por los cuales pasa. La temperatura y viscosidad del fluido también afectan a la cantidad de agua que se mueve a través del suelo.

### 3.3.1.2.- Medición de la infiltración

Para medir la infiltración de un suelo se emplean los infiltrómetros, que sirven para determinar la capacidad de infiltración en pequeñas áreas cerradas. Los infiltrómetros se usan con frecuencia en pequeñas cuencas o en áreas pequeñas o experimentales dentro de cuencas grandes.

### 3.3.1.3.- Capacidad de infiltración y factores que la controlan

Se llama capacidad de infiltración de un suelo a la rapidez con que éste permite el ingreso del agua al subsuelo.

Experiencias y observaciones realizadas han demostrado que esta capacidad decrece exponencialmente en el tiempo, desde un valor máximo inicial hasta un valor prácticamente constante, como se indica en la figura 19 y es controlado por diversos factores entre los que destacan; la estructura del suelo, la acción de las fuerzas capilares, la presencia del aire atrapado en el interior del suelo y la cobertura vegetal.

La estructura del suelo varía a medida que se va saturando; inicialmente cuando se encuentra seco o poco húmedo suele presentar un sistema de grietas que le dan alta capacidad de infiltración, pero conforme aumenta su contenido de humedad los materiales finos se expanden, las grietas se cierran gradualmente y como consecuencia decrece su conductividad hidráulica.

### 3.3.2.- Evapotranspiración

La evapotranspiración es una componente importante del ciclo hidrológico integrado por la conjunción de dos fenómenos; evaporación y transpiración.

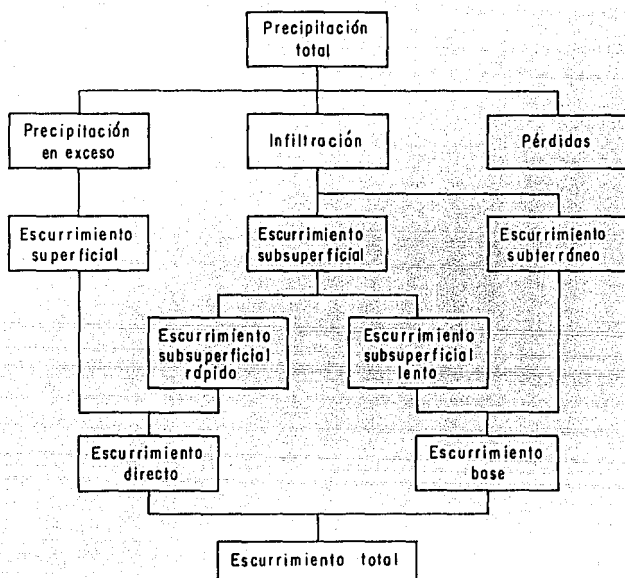


Fig. 17: Ciclo del escurrimiento, indica las diferentes fases entre la precipitación y el escurrimiento total.

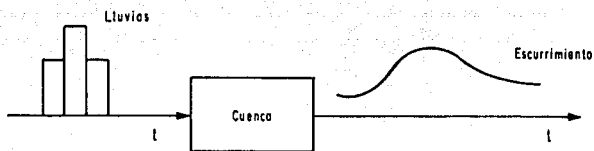


Fig 18.-Aplicación del concepto de sistema a la relación lluvia escurrimiento

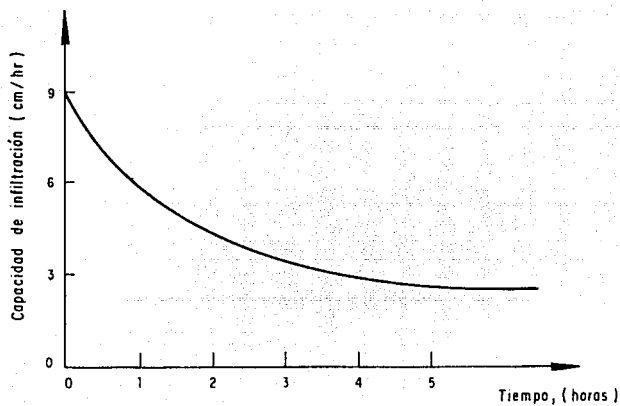


Fig 19.-La capacidad de infiltración decrece exponencialmente en el tiempo



### 3.3.2.1.- Naturaleza del proceso de evaporación

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

Un aumento en la temperatura del agua origina una mayor evaporación, ya que se incrementa la velocidad de las moléculas del agua y disminuye la tensión superficial. Los factores que afectan la evaporación son: temperatura del aire y agua, velocidad del viento, presión atmosférica y calidad del agua.

### 3.3.2.2.- Transpiración

Es esencialmente igual a la evaporación, sólo que la superficie de la cual las moléculas de agua escapan, no es la del agua sino principalmente la de las hojas de las plantas.

Es decir la diferencia de presión de vapor en el espacio comprendido entre las hojas y el aire exterior es una medida de la energía requerida para que el agua de las hojas se evapore. Los factores que afectan la transpiración pueden ser fisiológicos; como la densidad, comportamiento de las hojas, extensión y características de la cubierta protectora, estructura de la hoja y enfermedades de la planta o factores ambientales como la temperatura, radiación solar, viento y humedad del suelo.

### 3.4.- Mecanismos de recarga (infiltración) y descarga (evapotranspiración) de un acuífero.

La recarga natural del acuífero ocurre por la infiltración del agua de lluvia en formaciones permeables, aunque no toda el agua que se infiltra llega al acuífero, debido a que una parte de

ella es retenida por las formaciones que se encuentran arriba del nivel freático. El acuífero puede ser recargado también artificialmente mediante la infiltración de agua a través de obras construidas con este fin.

La descarga natural tiene lugar a través de manantiales y cauces por evapotranspiración, en áreas con nivel freático somero o subterráneamente al mar o cualquier masa de agua superficial (laguna, lago o vaso). El agua se mueve en el acuífero de las zonas de recarga a las de descarga, siguiendo trayectorias de menor resistencia y a una velocidad que depende de la permeabilidad de las rocas y del gradiente hidráulico.

El conocimiento de los mecanismos de recarga y descarga de un acuífero son indispensables para cuantificar su potencial y planear su explotación racional.

### III.4.- REPRESENTACION GRAFICA DE LOS NIVELES DEL AGUA SUBTERRANEA

#### 4.1.- Piezometría

Dado que el agua una vez infiltrada en el subsuelo queda fuera del alcance de toda medida directa convencional, hay que recurrir a determinar su régimen piezométrico para conocer el esquema de flujo con todas sus características, tales como dirección y sentido de las líneas de corriente, gradientes y evolución que sufren en el transcurso del tiempo. Este renglón es de primordial importancia ya que su conocimiento, junto con el de las transmisibilidades y coeficientes de almacenaje en la región por estudiar, permiten determinar, para las fechas elegidas; los caudales que fluyen por los acuíferos y las fluctuaciones que sufre el almacenamiento en el período de tiempo elegido.

El conocimiento piezométrico se logra instalando el número de pozos de observación o estaciones piezométricas necesarias y con una distribución adecuada en la región, en la inteligencia de que para este objeto pueden utilizarse pozos de explotación existentes y convenientemente elegidos, complementándose con los que se instalen en las perforaciones de explotación.

A curvas de igual altitud de la superficie piezométrica se les denomina a menudo curvas hidrosóhipsas o simplemente hidrohipsas (de hydro = agua, hipsa = altitud). Habitualmente se les asemeja con las curvas de igual presión (o depresión), y de ahí el término de curvas isopiezas.

La piezometría en los acuíferos se refiere a la medición de las fluctuaciones que se presentan en los niveles del agua subterránea, producidos por causas tanto naturales como artificiales.

Mediante pozos de observación, debidamente localizados y distribuidos en las áreas de estudio, es posible determinar las superficies piezométricas efectuando lecturas periódicas de los niveles estáticos del agua subterránea, que son en sí, los que interesan para el estudio del comportamiento de los acuíferos. Recibe el nombre de nivel estático, el nivel del agua subterránea que no se encuentra afectado por el bombeo en el pozo observado o en pozos cercanos a él.

En el caso de acuíferos libres, la superficie piezométrica coincide con el manto freático, mientras que en los confinados la superficie queda representada por la altura que alcanza el nivel del agua y que puede quedar por encima o por debajo del nivel del suelo, dependiendo de la diferencia de presiones que haya entre un plano de referencia y los puntos observados ( Fig.20 ).

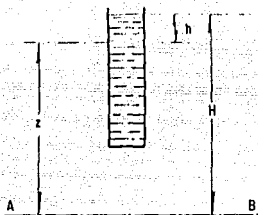
La obtención de los datos piezométricos y su debida interpretación son el punto de partida para el estudio cuantitativo del agua subterránea, por lo que al tomarlos debe tenerse cuidado de que no estén afectados por factores que puedan invalidarlos. Del procesamiento de los datos piezométricos pueden obtenerse diversas gráficas, de las cuales las más útiles son: hidrógrafos de pozos, planos de profundidad al nivel del agua, configuraciones piezométricas, evolución piezométrica y perfiles piezométricos.

#### 4.1.1.- Hidrógrafos de pozos

El hidrógrafo de un pozo es la representación gráfica del comportamiento del nivel estático con respecto al tiempo, pudiéndose notar en él, los períodos en que el acuífero sufre una recarga o descarga de acuerdo con los ascensos y descensos que presentan debido a causas naturales y artificiales tales como, la precipitación y las extracciones en épocas de bombeo ( Fig.21 ).



Nivel piezométrico de un acuífero libre



Nivel piezométrico de un acuífero confinado

Fig 20.—Niveles piezométricos

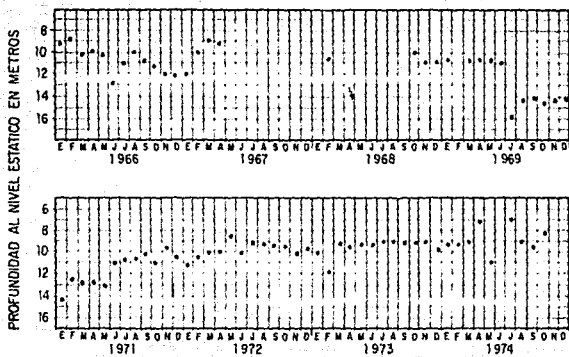


Fig 21.-Hidrógrafo de un pozo

Mediante los hidrógrafos es posible hacer una depuración de los datos obtenidos respecto al nivel estático determinando en ocasiones, que la lectura de éste, haya estado afectada por el bombeo en el propio pozo o en un pozo cercano; o bien se haya tomado una lectura equivocada por un falso contacto de la sonda o la medición de la longitud de cable introducido haya tenido error y que el nivel estático observado sea totalmente falso.

#### 4.1.2.- Planos de profundidad al nivel del agua

Estos planos se elaboran, graficando en planta la profundidad a que se encuentra el nivel del agua referido a la superficie del terreno, por lo que las curvas aparecen afectadas por la topografía del terreno. Cuando las profundidades al nivel del agua observadas en los pozos corresponden a un acuífero libre, las curvas de igual profundidad obtenidas por extrapolación son útiles para definir zonas en las cuales debido a la poca profundidad del nivel del agua, se presenta una descarga por evapotranspiración. En cualquiera de los demás tipos de acuíferos, el plano de profundidad al nivel estático, da una idea de la profundidad mínima a que deben perforarse los pozos y además permite seleccionar zonas apropiadas para la explotación desde el punto de vista de costos de bombeo ( Fig.21 ).

#### 4.1.3.- Configuraciones piezométricas

Para obtener las configuraciones piezométricas, es necesario referir los niveles estáticos a un plano horizontal, que por lo general es el nivel medio del mar. Lo anterior se logra efectuando una nivelación diferencial a la boca del pozo de observación en el cual se toma la profundidad al nivel estático.

Las curvas obtenidas por interpolación de los valores conocidos, representa la forma de la superficie piezométrica en un acuífero confinado o semiconfinado y la forma de la superficie freática en un acuífero libre ( Figs. 22 y 23 ).

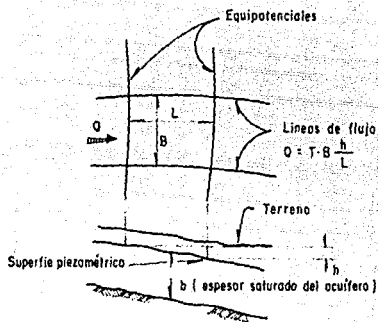


Fig 22.-Red de flujo

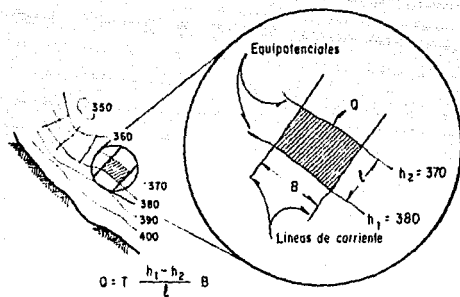


Fig 23.-Cálculo del caudal del flujo subterráneo



Debido a la aparente sencillez con que se elaboran estas curvas, muchas veces se sigue una interpolación mecánica que en muchos casos conduce a errores que invalidan las configuraciones, ya que no se toman en cuenta factores que pueden influir en el flujo del agua subterránea y por lo tanto en la forma de superficie piezométrica. Los factores que influyen en una configuración piezométrica pueden ser hidrológicos y geológicos, debiendo considerar la topografía de la zona, los afloramientos geológicos, los ríos, lagunas, manantiales, zonas empantanadas, distribución de pozos, etc.

Cuando ya se cuenta con configuraciones de curvas de igual elevación al nivel estático, es posible determinar la red de flujo, en la cual se presenta la dirección que sigue el agua subterránea, las zonas de recarga y descarga, los gradientes hidráulicos, el comportamiento de las fronteras, los efectos de la explotación, etc. Con la red de flujo trazada y considerando la Ley de Darcy puede hacerse una cuantificación de los caudales de flujo subterráneo. Normales a las curvas de igual elevación al nivel estático o equipotenciales, se presentan las líneas de corrientes que son las trayectorias que sigue el agua subterránea.

Se llama red de flujo a la malla formada por las líneas equipotenciales y las líneas de corriente ( Fig.22 ).

#### 4.1.4.- Evolución piezométrica

La evolución piezométrica se refiere a los cambios que sufre el nivel estático durante un intervalo de tiempo producidos por la acción combinada de recarga y descarga de agua subterránea en el acuífero. Con los datos obtenidos en los pozos de observación, se grafican curvas de igual evolución del nivel estático, interpolando valores, siempre y cuando se tomen en cuenta los factores que puedan influir en ellas, como son: determinación de zonas de bombeo, zonas de recarga y descarga, forma de la superficie freática (o piezométrica), tipo de acuífero, etc.

Las curvas de igual evolución debidamente graficadas, ayudan a cuantificar el cambio que haya sufrido el acuífero en su almacenamiento, pudiendo notarse zonas de recuperaciones o abatimientos dependiendo de las condiciones en que se encuentre la zona de estudio; así mismo, son de gran utilidad en la calibración de los modelos de simulación del comportamiento de los acuíferos.

### III.5.- PRUEBAS DE BOMBEO

El conocimiento de las características físicas o hidráulicas del sistema acuífero es básico para el estudio de los problemas señalados. Generalmente, un buen corte geológico derivado de la clasificación de las muestras de los materiales atravesados durante la perforación, proporciona una idea del tipo de sistema de que se trata. De la correlación de la litología de los materiales con los rangos de permeabilidad correspondientes, puede deducirse la transmisibilidad del acuífero; lógicamente, el valor así obtenido es sólo aproximado, ya que durante la perforación y el muestreo se alteran las condiciones que tiene el material *insitu*, especialmente por lo que se refiere al acomodo y grado de compactación, factores que tienen gran influencia en la permeabilidad .

Sin embargo, la transmisibilidad deducida en esta forma es prácticamente puntual, y la respuesta de los niveles de bombeo depende más bien de la transmisibilidad media de la porción del acuífero afectada por el mismo. Por otra parte, dicha respuesta no sólo es función de la transmisibilidad, sino también de otras propiedades hidráulicas y de las condiciones de frontera particulares del sistema de que se trata. Es necesario efectuar una prueba que dé una idea del tipo de sistema, y proporcione valores de las características hidráulicas del acuífero en el área de influencia del bombeo. Tales son los objetivos de la llamada prueba de bombeo. El agua fluye a través del acuífero desde cualquier dirección, aumentando su velocidad conforme se acerca al pozo; de acuerdo a la Ley de Darcy, en un medio poroso el gradiente hidráulico es directamente proporcional a la velocidad, por lo que el abatimiento en la superficie de agua, desarrolla un continuo pronunciamiento en su pendiente que hace que se forme un cono de depresión, cuyo tamaño y forma dependen del caudal, tiempo de bombeo, características del acuífero, pendiente del nivel freático y recarga dentro del área de influencia del pozo (Fig.24)

### 5.1.- Prueba de bombeo con régimen estable

Las fórmulas para un pozo descargado bajo condiciones de flujo estable, se derivaron desde tiempo atrás por varios investigadores, existiendo dos fórmulas básicas: una para acuíferos libres y otra para confinados.

para un acuífero libre ( Fig.25 ), la fórmula es:

$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi K} L \frac{r_2}{r_1} \quad (a)$$

donde:

$h_1$  = Altura piezométrica a la distancia  $r_1$  del pozo de bombeo

$h_2$  = Altura piezométrica a la distancia  $r_2$  del pozo de bombeo

$Q$  = Caudal de bombeo

$K$  = Permeabilidad

$L$  = Logaritmo base " e "

La fórmula correspondiente a un acuífero confinado (Fig.26) es:

$$h_1 - h_2 = \frac{Q}{2 \pi K B} L \frac{r_1}{r_2} \quad (b)$$

Donde :

$b$  = Espesor del acuífero

y los demás términos, son los mismos que los de la ecuación anterior.

La derivación de las fórmulas anteriores, está basada en las siguientes hipótesis simplificatorias:

- El acuífero es homogéneo e isótropo en el área afectada por el bombeo.
- El espesor saturado inicial del acuífero libre, es constante.
- Para el acuífero confinado, el espesor es constante.
- El pozo penetra totalmente el acuífero.

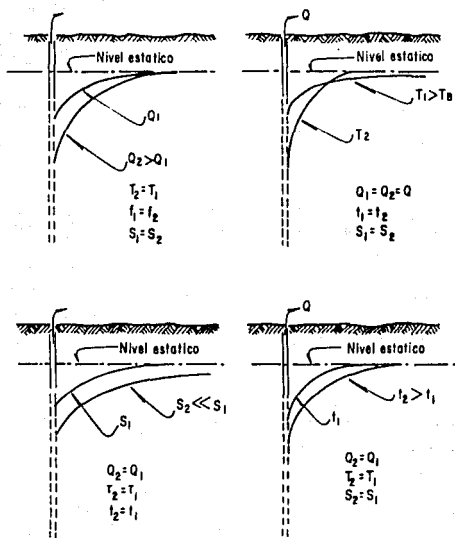
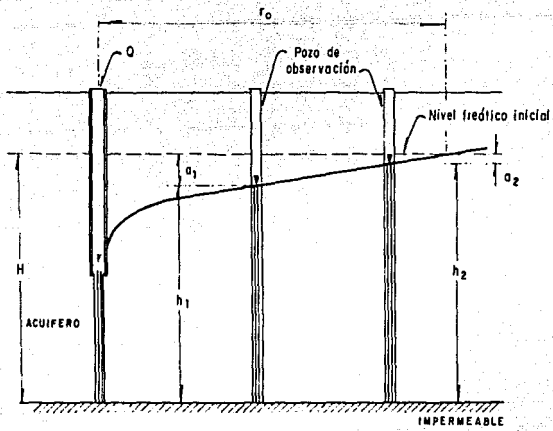


Fig 24 Influencia del caudal (Q) tiempo de bombeo (t) transmissibilidad (T) y almacenamiento (S) en la forma y dimensiones del cono de depresión.



$$H^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi K} L \frac{r_0}{r_1}$$

Fig 25.-Régimen de flujo estable hacia pozos en un acuífero libre

- e) La superficie piezométrica es horizontal antes de iniciarse el bombeo.
- f) El abatimiento y el radio de influencia no varían con el tiempo.
- g) El flujo es laminar.

Estas hipótesis parecen limitar seriamente la aplicabilidad de ambas fórmulas, pero en la realidad no es así; la permeabilidad media del acuífero es más o menos constante; aunque la superficie piezométrica no es completamente horizontal en ningún caso, el gradiente hidráulico es generalmente muy pequeño y no afecta sensiblemente la forma de la superficie piezométrica; el flujo es laminar en la mayor parte del área afectada por el bombeo, y sólo en la vecindad inmediata del pozo de bombeo puede llegar a ser turbulento; aunque el flujo no es rigurosamente estable, después de cierto tiempo de bombeo puede considerarse como tal en una área próxima al pozo de bombeo.

Quando se tienen dos pozos de observación, es posible determinar la permeabilidad, despejándola de las fórmulas anteriores, cuya forma quedaría de la siguiente manera:

Acuífero libre:

$$K = \frac{Q}{\pi (h_2^2 - h_1^2)} L \frac{r_2}{r_1} \quad (c)$$

Acuífero confinado:

$$K = \frac{Q}{2 \pi b (h_1 - h_2)} L \frac{r_1}{r_2} \quad (d)$$

Aún cuando las fórmulas anteriores son aplicables a algunos casos prácticos, tienen dos limitaciones principales: no proporcionan ninguna información respecto al coeficiente de almacenamiento del acuífero, y no permiten calcular la variación

de los abatimientos en el tiempo. Además, no son aplicables al estudio de acuíferos semiconfinados, ni a sistemas de penetración parcial, ni a muchos otros que se presentan con frecuencia en la práctica. Por otra parte, su aplicación requiere de dos pozos de observación, próximos al de bombeo, lo cual no siempre es económicamente posible, especialmente cuando el acuífero se encuentra profundo o es de gran espesor.

## 5.2.- Pruebas de bombeo en régimen transitorio

Theis desarrolló la fórmula para el régimen transitorio en 1935 en el cual por primera vez se tomó en cuenta el efecto del tiempo de bombeo para un acuífero confinado.

Mediante esta fórmula es posible predecir el abatimiento para cualquier tiempo de bombeo y determinar la transmisibilidad y la permeabilidad media antes de presentarse la estabilización de los niveles piezométricos en los pozos de observación. Para su aplicación, únicamente es necesario un sólo pozo de observación.

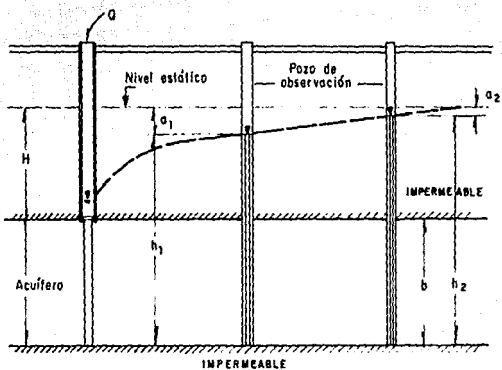
La derivación de la fórmula de theis se basa en las siguientes consideraciones:

- a) El acuífero es homogéneo e isótropo.
- b) El espesor saturado del acuífero es constante.
- c) El acuífero tiene extensión lateral infinita.
- d) El bombeo del pozo esta en función del almacenamiento del acuífero.
- e) El pozo penetra totalmente el acuífero.
- f) El agua del acuífero es liberada instantáneamente con el abatimiento.

En su forma más simple, la fórmula de theis es:

$$a = \frac{Q}{4 \pi T} W(u) \quad (e)$$





$$a = h_1 - h_2 = \frac{Q}{2\pi K b} L \frac{r_1}{r_2}$$

( Fórmula de Thiem )

Fig 26 Régimen de flujo estable hacia pozos en acuífero confinado

donde :

a = Abatimiento a la distancia r del pozo

Q = Caudal de bombeo

W(u) = "Función de pozo u" y es una forma de expresar la siguiente integral exponencial.

$$\int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = W(u) = -0.5772 - \log_e u + u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} + \frac{u^4}{4 \times 4!} + \dots$$

En la expresión anterior:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (f)$$

donde:

r = Distancia al pozo de bombeo

t = Tiempo de bombeo

S = Coeficiente de almacenamiento

T = Transmisibilidad

Los valores de la función de pozo en relación con los de u, se encuentran en la tabla 9, los cuales al ser vaciados en una gráfica de W(u) contra 1/u en papel logarítmico, dan como resultado una curva tipo para interpretar pruebas de bombeo en pozos totalmente penetrantes en acuíferos confinados (Fig.27).

Con base en las fórmulas (e) y (f) Theis desarrolló un método gráfico de solución para determinar los parámetros T y S siguiendo la siguiente secuela:

- Trazar la curva tipo W(u) - 1/u en papel con trazado doble logarítmico.
- Construir la gráfica abatimiento - tiempo (cuando se tiene un sólo pozo de observación), con los datos obtenidos en campo.
- Sobreponer las gráficas, manteniendo los ejes paralelos, y buscar la coincidencia de la curva de campo y la curva tipo.

- d) Seleccionar un punto de ajuste y obtener sus coordenadas.
- e) Sustituir los valores de las coordenadas en las ecuaciones (e) y (f) y despejar los valores de T y S.

En la figura 28 se presentan observaciones realizadas en una prueba de bombeo, su gráfica y la interpretación con un ajuste a la curva tipo.

Por lo general, los puntos correspondientes a los primeros tiempos de la prueba, son los que presentan una mayor discrepancia entre las condiciones reales y las hipótesis establecidas para la obtención de la fórmula, ya que existe un cierto retraso entre el abatimiento de la superficie piezométrica y la liberación del agua, retraso que puede ser mayor en esa parte de la prueba, en la que los niveles se abaten rápidamente; por otro lado, el caudal puede variar apreciablemente por el incremento brusco de la carga de bombeo, etc. para tiempos mayores de bombeo estas discrepancias se van minimizando y se tiene un mejor ajuste entre la teoría y las condiciones reales.

#### 5.2.1.- Fórmula modificada para pruebas de bombeo con régimen transitorio

Trabajando con la fórmula de Theis, Jacob (1935) encontró que para tiempos largos ( $t > 5S r^2/T$ ) los valores de u resultan lo suficientemente pequeños para que la fórmula (e), pueda modificarse sin un error significativo a la forma siguiente:

$$a = \frac{2.3 Q}{T 4\pi} \log \frac{2.25 T t}{s^2 r}$$

A partir de esta fórmula desarrolló el método gráfico de interpretación que lleva su nombre, y que consiste en lo siguiente:

- a) Construir la gráfica abatimiento (en escala aritmética) contra tiempo (en escala logarítmica).

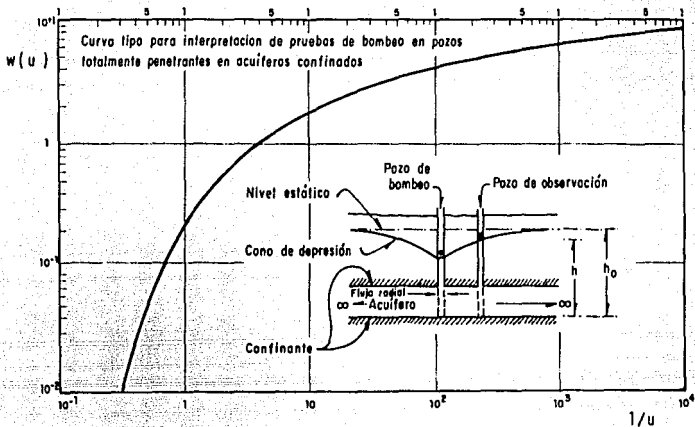


Fig.-27 Curva tipo

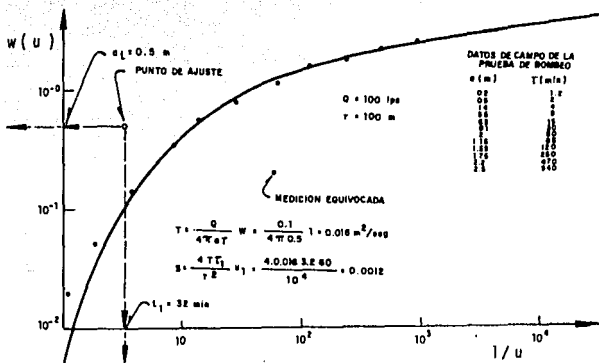


Fig 28.-Interpretación de una prueba de bombeo





- b) Pasar una recta por los puntos que se alinean y determinar su pendiente.

Los puntos correspondientes a los primeros minutos de la prueba general se apartan de la recta, debido a que corresponden a tiempos cortos ( $t < 5 S r^2/T$ ) para los cuales no es válida la fórmula de Jacob.

- c) Si la pendiente de la recta de ajuste es  $m$ , la transmisibilidad puede obtenerse de la expresión:

$$T = \frac{0.183 Q}{m} \quad (h)$$

- d) Determinar el valor del tiempo,  $t_0$ , para el cual la prolongación de la recta de ajuste intercepta la línea de abatimiento nulo.
- e) Calcular el coeficiente de almacenamiento mediante la expresión:

$$s = \frac{2.25 T t_0}{r^2} \quad (i)$$

En la figura 29 se muestra una aplicación del método cuando se tiene un sólo pozo de observación.

El método anterior también puede seguirse, cuando se conocen los abatimientos en varios pozos de observación para un tiempo dado. En este caso se grafica el abatimiento (escala aritmética) contra la distancia (escala logarítmica). Los coeficientes buscados se obtienen mediante las fórmulas:

$$T = \frac{0.366 Q}{m} \quad \text{y} \quad s = \frac{2.25 T t}{r_0^2} \quad (j)$$

En donde  $r_0$  corresponde al valor para el cual la prolongación de la recta de ajuste intercepta la línea de abatimiento nulo.

### 5.3.- Acuíferos semiconfinados con flujo vertical

En las secciones precedentes se han presentado las ecuaciones del flujo en acuíferos confinados, supuesto el caudal de extracción constante o bien el descenso constante, pero siempre bajo la hipótesis de capas confinantes impermeables, que no ceden agua del almacenamiento y suponiendo que es despreciable la componente vertical del flujo; sin embargo, existen formaciones que no son completamente impermeables llegando a constituir estratos o capas que bajo ciertas condiciones pueden llegar a aportar cantidades considerables de agua por flujo vertical, la cual se agrega posteriormente al flujo horizontal del acuífero principal, dando lugar a lo que se llama un acuífero semiconfinado (figura 30). Las ecuaciones de solución para este tipo de acuíferos considerando flujo radial transitorio en acuíferos de extensión infinita cuyas capas confinantes permiten el paso del agua, desde o hacia el acuífero son las que se plantean a continuación.

#### 5.3.1.- Método de la curva tipo para flujo no estable

$$v^2 h - \frac{K'}{K b B}, (h - H) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (k)$$

Hantush y Jacob (1937) resolvieron la ecuación (k) para un acuífero homogéneo e isótropo de extensión infinita y completamente penetrado por un pozo de diámetro infinitesimal.

Siguiendo las mismas hipótesis de Theis complementadas con los conceptos de recarga lineal, carga constante del agua estancada que abastece la recarga y refracción horizontal de ésta, siendo la solución:



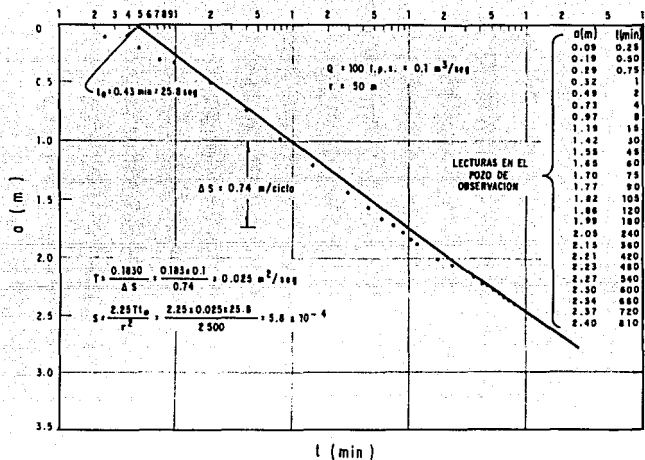


Fig 29.-Interpretación de una prueba de bombeo por el método de Jacob

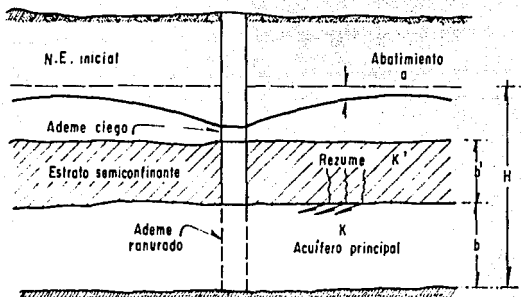


Fig 30- Acuífero semiconfinado

$$a = \frac{Q}{4 \pi T} W(u, r/B) \quad (l)$$

$$W(u, r/B) = \int_u^{\infty} \frac{1}{x} e \left[ -x - \frac{r^2}{4 B^2} x \right] dx \quad (m)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (n)$$

$$B = \sqrt{K b b'/k'} = \sqrt{T b'/k'} \quad (ñ)$$

El método de solución es similar al empleado por Theis para acuíferos confinados, superponiendo las curvas de campo a las curvas tipo, buscando siempre la mejor coincidencia entre ambas, definiéndose de esta manera las coordenadas de los parámetros que se requieren para la solución de las fórmulas.

### III.6.- MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO GEOHIDROLOGICO Y BALANCE GLOBAL DEL ACUIFERO

#### 6.1.- Definición de modelo de un acuífero

Se entiende por modelo de un acuífero el procedimiento que permite realizar la simulación del comportamiento dinámico o de la respuesta del acuífero a las diferentes hipótesis de explotación a las que se somete, o sea que pueden conocerse las variaciones de los niveles piezométricos del acuífero bajo diferentes políticas de extracción.

#### 6.1.- Información requerida para formar un modelo

El estudio del comportamiento de cualquier sistema requiere de un modelo que permita relacionar las causas con los efectos, mediante parámetros representativos del sistema. En el estudio de un acuífero, las causas son su recarga y su descarga; los efectos, las evoluciones de la superficie piezométrica, y los parámetros que ligán unos y otros son las características físicas e hidráulicas del acuífero.

Las causas y efectos no pueden relacionarse si no se tiene un conocimiento completo del acuífero que se va a modelar. Entre la información con que debe contarse para formar un modelo está la siguiente:

- a) Características físicas del acuífero (extensión y espesor, comportamiento de las fronteras).
- b) Características hidráulicas (distribución de la transmisibilidad y el coeficiente de almacenamiento del acuífero; permeabilidad de los acuíferos semiconfinados).
- c) Historia de las extracciones (volúmenes y distribución del bombeo, en el área y en el tiempo, para el mayor intervalo de tiempo posible).

- d) Historia piezométrica (evolución de los niveles piezométricos del acuífero en el mismo intervalo de tiempo).
- e) Condiciones piezométricas iniciales.
- f) Volumen y distribución de la recarga

### 6.3.- Tipos de modelos

Los diferentes tipos de modelos se diferencian en la forma de resolver la ecuación diferencial y en la forma de describir el sistema.

#### 6.3.1.- Modelos analíticos

Son los que dan la solución exacta de la ecuación diferencial por medio de funciones analíticas o tabuladas. Sólo se ha resuelto para casos particulares, y relativamente simples.

Un método que resulta muy útil en algunos casos es el de las imágenes. Para aplicarlo, se requiere la existencia de un acuífero homogéneo y unos límites rectilíneos. Estos límites pueden ser impermeables o de altura piezométrica constante. En gran número de casos se puede hacer la simplificación de acuíferos homogéneos y asimilar los límites a líneas rectas, por lo menos para conseguir una aproximación. En cualquier caso, esta simplicidad de cálculo hace que sea un método que puede ser interesante aplicar antes de tantear otros más complicados.

#### 6.3.2.- Modelos matemáticos

Se entiende por modelo matemático el que utiliza métodos numéricos para resolver la ecuación diferencial. El método más desarrollado es el de diferencias finitas con el que se obtiene la solución de la ecuación para una serie de puntos discretos en el espacio y en el tiempo. De acuerdo con este método, la descripción del sistema se hace en elementos celulares asignados a cada uno de los puntos del espacio.

La ecuación diferencial se aproxima por una serie de ecuaciones algebraicas en que las incógnitas son las alturas piezométricas en los puntos escogidos, y las particularidades del método consisten en el planteamiento de esas ecuaciones y en la forma de solucionarlas. Recientemente, otro método, el de los elementos finitos, han adquirido un gran auge.

### 6.3.3.- Modelos analógicos

Los modelos analógicos resuelven la ecuación diferencial de una forma indirecta. Para ello, se utiliza un fenómeno físico que tenga una ecuación diferencial del mismo tipo que la de los acuíferos. Los más importantes son los que utilizan la analogía eléctrica, ya sea los más simples de papel conductor o los más complejos de capacidades y resistencias. Los modelos de fluido viscoso (Hele - Shaw) gozan de cierta tradición en trabajos de laboratorio y de investigación.

Si es fácil reproducir este fenómeno físico y se tiene instrumental adecuado para medir su reacción, se habrá resuelto la ecuación diferencial. Los parámetros de los coeficientes y las variables de las dos ecuaciones diferenciales serán equivalentes y estarán relacionados por unos factores de escala.

La solución en el modelo se obtiene después de excitarlo físicamente. Los valores equivalentes en el prototipo se obtiene de éstos a través de los factores de escala.

### 6.4.- Proceso de modelación. Modelo conceptual

Cualquier método es una simplificación de una situación real que se conoce sólo puntualmente a través de un número limitado de datos. Por otra parte, si se conociese exactamente la situación real, no sería operativo ni posible reproducirla exactamente en el modelo planteado. El modelo es una simplificación. La validez de la simplificación depende del objetivo que se pretende conseguir

con el modelo. Cuando el objetivo se complica se tiene que complicar el modelo.

El proceso a seguir en una modelación es el de la figura 31. De la situación real a través de los estudios geohidrológicos se pasa a un modelo conceptual. De acuerdo con el objetivo y las necesidades de simulación se elige el método operativo.

En la figura 32 se expresan gráficamente los procesos que se siguen en la utilización de un modelo. Se asignan unos parámetros y unas variables al modelo, se simulan unas acciones históricas conocidas y se inspeccionan los resultados para ver si son coherentes con los datos reales que se poseen. Si no lo son habría que modificar el modelo conceptual. Para ello, conviene reconsiderar el problema, para ver si alguna de las hipótesis puede ser modificada razonablemente de acuerdo con los datos geohidrológicos disponibles, o incluso puede ser necesario realizar alguna investigación complementaria.

Si los resultados son coherentes, se pasa a la etapa siguiente, que es la de comparar los resultados con los datos históricos. Si no se ha conseguido una aproximación razonable, se procede a la modificación de los parámetros, hasta que se consiga un ajuste suficiente. Estas dos etapas, a veces, se realizan a la vez o puede alterarse su orden. Una vez realizado este proceso, que es el de identificación, se pasa al siguiente, que es el de simulación. El proceso de optimización es el análisis de los resultados de la simulación de las alternativas posibles y la propuesta de las soluciones existentes. En este último proceso pueden ya entrar en juego, además de los factores técnicos, otros factores: económicos, políticos, legales o sociales.

#### 6.5.- Utilización de modelos de acuíferos

El caso más general de utilización de modelos de acuíferos ha sido simular su comportamiento ante distintas alternativas de utilización del agua subterránea y tratar de elegir la más

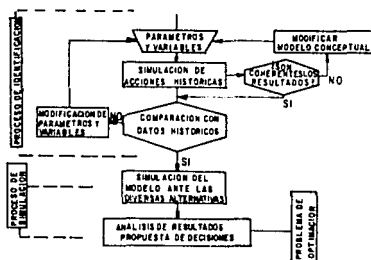


Fig. 31: Procesos de una simulación

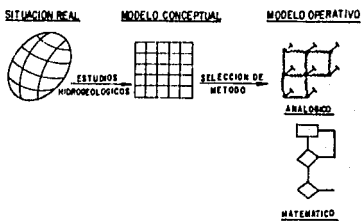


Fig. 32.- Procesos de calibración y simulación



conveniente. En algunos casos sólo se ha pretendido conocer la respuesta del acuífero ante una alternativa única, para ver si era técnicamente factible. A parte de esto, se han utilizado también para fines muy diversos, entre los que destacan el de simular el movimiento de los contaminantes en los acuíferos y el estudio de las redes de filtración en presas.

#### 6.6.- Obtención de los datos

La construcción y utilización de un modelo de simulación de un sistema acuífero precisa de la elaboración previa de un conjunto de datos tales que permitan definir principalmente:

- a) La geometría del sistema
- b) Las características hidráulicas
- c) El funcionamiento hidráulico

Los datos más importantes y el modo de obtenerlos, se presentará a continuación considerando cada uno de los tres aspectos arriba mencionados.

##### 6.6.1.- Obtención de datos para el conocimiento de la geometría del sistema

- Cota de la base y el techo de cada una de las formaciones consideradas: Se obtienen a partir de los datos de los sondeos existentes y de la cartografía geológica e hidrogeológica de detalle con o sin apoyo de geofísica.

- Límite de cada una de las formaciones: Se obtiene a partir de la cartografía geológica y de los datos de sondeos, con o sin apoyo de geofísica.

- Límites del sistema, sean físicos (barreras impermeables) o hidráulicas (río, lago o mar conectados al acuífero): Se obtienen de los datos de cartografía geológica y sondeos, por un

lado, y de la observación de las superficies piezométricas, resultados de ensayos de bombeo e hidrogramas de los pozos y piezómetros.

#### 6.6.2.- Obtención de datos para el conocimiento de las características hidráulicas

- Distribución espacial de la permeabilidad (en algunos casos, basta con la transmisibilidad) de cada una de las formaciones: Se obtiene a partir de ensayos de bombeo (son caros). Los análisis granulométricos y ensayos con permeámetros pueden introducir errores importantes si no se manejan con cuidado, pero pueden ser un buen complemento si previamente se establece una correlación con datos más precisos.

- Grado de anisotropía del sistema y de las formaciones: Es un dato difícil de conseguir, y aunque puede obtenerse mediante ensayos de bombeo, ensayos de piezómetros o en laboratorio.

- Distribución espacial de la porosidad eficaz; para acuíferos y acuitardos permanentemente cautivos puede prescindirse de este dato. En acuíferos libres se puede obtener de ensayos de bombeo, pero el valor obtenido es poco fiable, y suele ser notablemente menor que el real. Es mejor obtenerlo de balances locales y del estudio del material que forma el acuífero.

- Distribución espacial del coeficiente de almacenamiento para cada una de las formaciones; para las formaciones que funcionen como libres se toma el coeficiente de almacenamiento igual a la porosidad eficaz, ya que en general, se simulan largos períodos de tiempo. El coeficiente de almacenamiento para acuíferos cautivos se obtiene de ensayos de bombeo.

### 6.6.3.- Obtención de datos para definir el funcionamiento hidráulico

- Identificación de las áreas de recarga y descarga: Se obtiene por la observación y por el estudio de las superficies piezométricas. En ocasiones se puede realizar un trazado artificial o aprovechar un trazado natural.

- Establecimiento de las relaciones entre acuíferos: Se obtiene del estudio de las superficies piezométricas con apoyo de datos de composición química del agua tratados por métodos hidrogeoquímicos.

- Establecimiento de las relaciones con las aguas superficiales: Se obtienen por el estudio de las superficies piezométricas, por observaciones directas o de aforo o también por métodos hidrogeoquímicos y de trazado natural o artificial.

- Tipos de condiciones en los límites : Se obtienen por la observación de las isopiezas; si el límite es una divisoria de aguas subterráneas es preciso estudiar su estabilidad a partir de los datos históricos de niveles.

### 6.7.- Presentación de los datos

Aunque la construcción es una labor conjunta del especialista en simulación y el hidrólogo (la construcción del modelo) se precisa de una presentación que facilite la transmisión de información.

#### 6.7.1.- Presentación de los datos geométricos

La forma más usual de presentar los datos geométricos es mediante planos donde se representa por medio de curvas de nivel cada una de las superficies límite (isohipsas), tomando como referencia un plano horizontal cualquiera, o en caso de acuíferos

costeros, el nivel medio del mar. Uno de estos planos debe ser la propia superficie topográfica, con indicaciones suficientes como para poder conocer la cota del agua de los ríos, lagos y canales existentes. Estos planos deben contener los límites de cada uno de los acuíferos y acuitardos.

#### 6.7.2.- Presentación de los parámetros físicos

Los datos sobre los parámetros físicos del acuífero (permeabilidad, transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento, porosidad, grado de anisotropía, etc.) deben presentarse separadamente para cada una de las unidades geohidrológicas que se consideren.

La presentación de cada uno de los valores que convenga considerar puede darse simplemente como un punto con una cifra (como si fuesen cotas topográficas). Conviene indicar si se trata de una información de carácter puntual o de carácter regional, en cuyo caso, ha de darse una referencia del área sobre la que se extiende.

#### 6.7.3.- Presentación de los datos hidráulicos

Cuando se trata de aportaciones (entradas +, salidas -) distribuidas sobre una superficie, lo más cómodo es preparar planos con curvas de igual valor de aportación por unidad de superficie. debe establecerse un plano por cada intervalo de tiempo que se considere. Las aportaciones localizadas, tales como los bombeos en pozos, salidas de fuentes o las recargas a través de socavones, fosas o pozos, se suelen dar tabuladas en un cierto orden, acompañadas por un plano con su localización.

Por su parte, los niveles de agua suelen presentarse en planos de isopiezas, uno por cada acuífero. Los planos de isopiezas deben definir también los niveles de agua libre, tales como los de los ríos, canales, lagos, etc., correspondientes al

momento considerado. Conviene adjuntar a las superficies piezométricas algunas gráficas de la variación de los niveles del agua subterránea en el tiempo.

#### 6.8.- Balance global del acuífero

La cuantificación del agua subterránea existente en una zona dada, es un problema que se ha tratado de resolver por diferentes métodos, entre los que se cuenta, el análisis del ciclo hidrológico y la aplicación de los coeficientes de infiltración a formaciones geológicas que afloran en las zonas estudiadas.

Los valores obtenidos por estos dos métodos que se encuentran dentro de los llamados indirectos carecen de validez debido al gran número de variables que los afectan. La forma adecuada de cuantificar la potencialidad de los acuíferos, es utilizado un método que trabaja directamente con ellos, considerando el agua ya filtrada y relativamente al margen de los fenómenos que ocurren en la superficie; dicho método recibe el nombre de " Balance de Agua Subterránea ".

Los acuíferos son sistemas en los cuales puede aplicarse el principio de la conservación de la materia, ya que en un intervalo de tiempo dado, tienen lugar las recargas y descargas que hacen variar el almacenamiento de agua ya existente, aumentándolo o disminuyéndolo, según estos factores se presenten uno mayor que el otro. El fin primordial de los balances de agua subterránea es determinar el volumen de recarga a los acuíferos, y poder hacer así, el uso racional de los mismos.

La ecuación que expresa el principio de la conservación de la materia, aplicado a un acuífero o porción del mismo, se llama " Ecuación de Balance de Agua Subterráneas " y su forma más simple es la siguiente:

$$\text{Recarga} - \text{Descarga} = \text{Cambio de Almacenamiento}$$

Los términos del miembro izquierdo de la ecuación, se presentan de diferentes formas; así la recarga puede ocurrir por flujo subterráneo (Eh) y/o por recarga vertical en el área de balance (R) y la descarga puede tener lugar por flujo subterráneo (Sh); aflorando en forma de manantiales o a una corriente superficial (D); mediante pozos de bombeo (B), y por evapotranspiración en zonas con nivel freático somero (Ev). El segundo miembro puede indicarse como V, quedando la expresión anterior de la siguiente manera:

$$Eh + R - Sh - D - B - Ev = V$$

Dependiendo de cómo se presente la recarga y descarga de un acuífero en estudio durante un intervalo de tiempo dado, los términos de la ecuación anterior pueden o no aparecer. En el caso de acuíferos limitados totalmente por fronteras impermeables, Eh y Sh no aparecerán, ya que no existe entrada ni salida por flujo subterráneo; si no existen niveles freáticos someros, Ev puede eliminarse, lo mismo que D en el caso de no existan efloramientos.

La ecuación de balance para un acuífero dado, puede variar de un intervalo de tiempo a otro, según las condiciones climáticas que prevalezcan en la zona de estudio, pudiendo así aparecer el término R en un período lluvioso o eliminándolo si la ecuación se plantea para un período de estiaje. Siempre que se plantee una ecuación de balance, es necesario tener una idea más o menos clara del comportamiento del acuífero a estudiar.

## **CAPITULO IV**

### **" MANEJO DE ACUIFEROS "**

#### IV.1.-INTRODUCCION

El manejo de acuíferos es un concepto que se refiere a la explotación racional y eficiente de el acuífero o acuíferos de interés y la prevención o en su defecto, solución de los problemas que dicha explotación ocasiona.

El adecuado control de la explotación del agua subterránea sólo se puede lograr cuando se ha elaborado un simulador del comportamiento del acuífero; sin embargo, la simulación es un proceso sumamente laborioso y que requiere la recopilación de mucha información de gran calidad y veracidad. A pesar de estas dificultades, y dada la importancia que tiene el agua como recurso indispensable para la vida del hombre, es de esperarse que se empiece a utilizar más la simulación para la adecuada explotación de acuíferos, la cual se puede lograr mediante pozos verticales, galerías o drenes horizontales.

En cuanto a los problemas más comunes ocasionados por la explotación del agua subterránea, se tiene la sobreexplotación del recurso, el hundimiento del terreno, la intrusión salina y la contaminación, hechos demasiado graves y que demandan la adecuada planeación de las obras a realizar en las zonas localizadas en el acuífero o en el medio geográfico que lo rodea.



## IV.2.- CAPTACION Y OPERACION DE LA DISPONIBILIDAD HIDRAULICA

### 2.1.- Captaciones de agua

Se llamarán captaciones de agua, a todo dispositivo que permita poner en uso el agua contenida en los acuíferos. En general los diferentes tipos de captaciones de agua, de acuerdo con sus características de funcionamiento hidráulico, pueden clasificarse en :

**Pozos de perforación vertical:** Son de forma cilíndrica y de diámetro mucho menor que la profundidad. El agua penetra a lo largo de las paredes de pozo creando un flujo de tipo radial. Actualmente son el tipo de captación más común.

**Drenes y galerías :** Estas perforaciones o instalaciones horizontales de sección más o menos circular y con una longitud mucho mayor que el diámetro. El agua penetra a lo largo de la obra, creando un flujo paralelo y horizontal. Fue un tipo de captación muy frecuente en tiempos pasados, pero actualmente sólo se realiza en casos especiales.

**Zanjas:** Son excavaciones rectilíneas en trinchera, en general de poca profundidad, poco usadas como captaciones, y cuyo funcionamiento tiene notable similitud con el de los drenes y galerías.

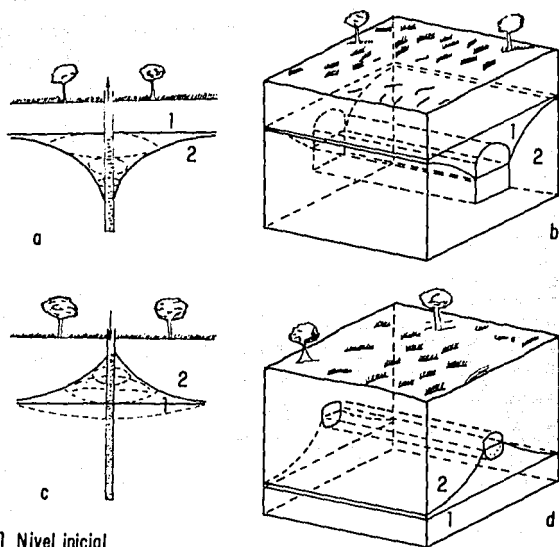
**Pozos de drenes radiales:** Son obras consistentes en un pozo revestido al que se conectan en varias direcciones drenes horizontales. El conjunto actúa como un pozo de gran diámetro.

Si se considera un pozo que lleve bombeando un tiempo largo, la superficie piezométrica adopta la forma de un cono invertido o embudo en cuyo centro se sitúa el pozo (fig. 33). El efecto primario de bombeo es producir un descenso del nivel del agua, a

fin de establecer un gradiente hidráulico que ponga en movimiento el agua hacia la captación. En el pozo de agua se debe penetrar el acuífero por una superficie cilíndrica relativamente pequeña y por lo tanto se precisa un gradiente importante para que, de acuerdo con la ley de Darcy, exista un flujo igual al caudal bombeado. La misma cantidad de agua debe pasar por cualquier cilindro concéntrico con el pozo, pero como la superficie de éstos aumenta en proporción directa al radio, el gradiente preciso para establecer el flujo es tanto menor cuanto más se aleja del pozo, lo cual justifica la forma del embudo de descensos de la fig. 33a. Un razonamiento similar puede hacerse para una captación horizontal, resultando entonces la formación de un valle en la superficie piezométrica, cuyo punto más bajo coincide con la captación (fig.33b).

En el caso de introducir agua en un acuífero mediante un pozo o una captación horizontal se tiene el fenómeno inverso, adquiriendo la superficie piezométrica en las proximidades de la captación la forma de un domo o de una cresta, respectivamente (fig. 33.c y 33.d).

Se dice que un pozo es totalmente penetrante o completo (fig. 34.a) cuando una zona filtrante abarca la totalidad del espesor del acuífero. Si sólo abarca una parte del acuífero se llama incompleto (fig. 34.b). Si el pozo es incompleto, pero su zona filtrante se inicia en el techo del acuífero (también en el caso de que acabe junto a la base del mismo) el pozo se llama, por razones obvias, parcialmente penetrante (fig. 34-c). En acuíferos libres el pozo completo es el que abarca todo el espesor del acuífero, cuando los niveles son los de bombeo (fig.34).



1 Nivel inicial  
2 Nivel actuando la captación

Fig. 33.- Efecto de las captaciones en el nivel del agua en los acuíferos.

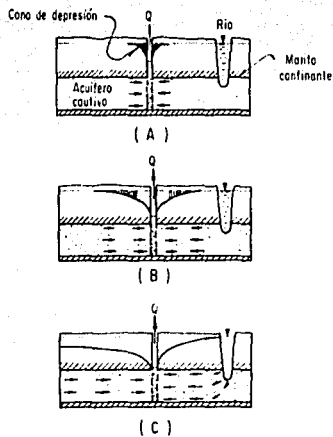


Fig 34.-Evolución de los niveles piezométricos en un pozo próximo a un río

A veces por razones de construcción, se obliga a que los pozos sean incompletos, a pesar de trabajar éstos en peores condiciones que los completos de similares características. Algunas de las razones pueden ser:

a)- Necesidad de alejar algunos decímetros el extremo de la zona filtrante de los límites superior e inferior del acuífero, a fin de evitar problemas de entrada de materiales finos y derrumbamiento de arcillas.

b)- Necesidad de evitar algunas zonas del acuífero que contienen materiales excesivamente finos, teniéndose a veces que dividir la zona filtrante en tramos.

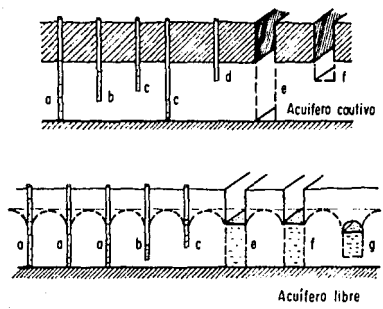
c)- Gran potencia del acuífero, de modo que resulta más económico obtener el caudal deseado con un pozo de peores condiciones pero más barato.

d)- Dificultad de agotar el agua en el pozo a fin de continuar los trabajos de excavación cuando éstos se realizan manualmente.

## 2.2.-Concepto de régimen permanente y régimen no permanente

Cuando se inicia el bombeo a caudal constante en un pozo, y en general en cualquier captación, en los primeros instantes se extrae agua del almacenamiento en los alrededores del pozo, gracias al descenso del nivel producido. Poco a poco el cono de influencia va extendiéndose, de forma que la cantidad de agua producida a consecuencia del descenso del nivel iguala a la extraída por el pozo (fig.35). El período durante el cual los descensos van aumentando se llama régimen no permanente o simplemente régimen transitorio.

En un acuífero que no puede recibir agua del exterior, todo el caudal extraído por el pozo debe proceder del almacenamiento y por lo tanto, el régimen es siempre no permanente, sin embargo, y debido a la superficie creciente del cono de influencia, si el



- Nivel estático      - - - - - Nivel dinámico
- a ) Pozo totalmente penetrante
  - b ) Pozo incompleto
  - c ) Pozo parcialmente penetrante
  - d ) Pozo abierto en el fondo
  - e ) Zanja totalmente penetrante
  - f ) Zanja parcialmente penetrante
  - g ) Galería o dren (captación incompleta)

**Fig 35** Clasificación de las captaciones

acuifero es de extensión muy grande (infinito para efectos prácticos), la velocidad de descenso va disminuyendo paulativamente hasta que llega un momento en que es tan lento que se puede aceptar, que prácticamente los descensos se han estabilizado y entonces se dice que se ha alcanzado el régimen permanente no estacionario. Los acuíferos semiconfinados reciben una recarga y cuando esta iguala al caudal bombeado, se establece un verdadero régimen estable.

Considerando los acuíferos libres, éstos pueden recibir algo de recarga procedente de las lluvias anteriores y la acumulada en el medio no saturado que tiene encima, o bien el cono de influencia puede alcanzar algún río o masa de agua superficial. En estos casos también puede establecerse un régimen permanente real (fig. 36).

La característica fundamental del régimen permanente es que no se toma agua del almacenamiento del acuífero. Este acuífero es sólo un transmisor de la recarga. En cambio, en régimen variable el acuífero no sólo transmite agua, sino que la proporciona, al menos en parte, entrando en juego el coeficiente de almacenamiento.

### 2.3.- Efectos de la anisotropía y heterogeneidad de los acuíferos reales en las captaciones

Muy frecuentemente la permeabilidad de un terreno varía según la dirección en que se observe (anisotropía). Una de las causas de esta anisotropía es la estratificación. En los terrenos estratificados, la permeabilidad vertical puede ser fácilmente muchas veces inferior a la horizontal. Si el flujo es perfectamente horizontal, la anisotropía no tiene importancia, pero cuando la velocidad del agua tiene una componente vertical, como sucede en las proximidades de los pozos o zanjas incompletas o en el caso de acuíferos libres, el efecto de anisotropía aparece

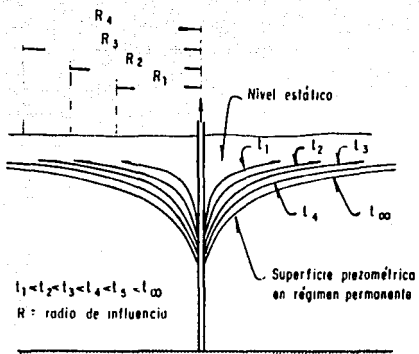


Fig 36- Formación del cono de descenso



disminuyendo esa componente vertical, o sea, evitando el encurvamiento de las líneas de corriente.

La heterogeneidad consiste en la variación de la naturaleza del medio de un lugar a otro. Una causa muy frecuente de heterogeneidad es la aparición de intercalaciones de materiales de diferente origen. Otras veces la heterogeneidad consiste en el cambio más o menos gradual del material del acuífero, con la consiguiente variación de la permeabilidad. Esta variación puede ser tanto en dirección horizontal o vertical.

#### 2.4.- Concepto de caudal específico y eficiencia de un pozo

Se llama caudal específico de un pozo al cociente entre el caudal de agua bombeada y el descenso del nivel producido.

$$Q_e = \frac{Q}{S_p}$$

El caudal específico de un pozo no es constante ya que con el tiempo el descenso aumenta. Sin embargo, los descensos tienden a estabilizarse y por lo tanto, el caudal específico también. El nivel de agua dentro de un pozo real es menor o a lo más, igual que el nivel de agua en el exterior del pozo, puesto que existe una pérdida de carga al atravesar el agua la zona filtrante. Se llama eficiencia del pozo a : la relación entre el descenso teórico o descenso del acuífero y el descenso medido en el pozo.

En la eficiencia intervienen las pérdidas en el pozo más las pérdidas por circulación en la porción del acuífero próximo y dentro del propio pozo. Generalmente las primeras son las más importantes y de ahí la necesidad de seleccionar muy bien las zonas filtrantes. Los pozos poco eficientes no son económicos, por cuanto que para bombear el mismo caudal que un pozo eficiente, se precisan mayores descensos de nivel y por lo tanto menor altura de bombeo.

La eficiencia de un pozo puede modificarse con el tiempo a consecuencia de varios fenómenos, tales como la aparición de incrustaciones. En cierta forma, un pozo incompleto contiene una causa de ineficiencia, ya que en igualdad de condiciones su caudal específico es menor que el de un pozo completo debido al encurvamiento de las líneas de corriente por la aparición de el efecto de emergencia, y la menor superficie de paso del agua. en respecto al origen del acuífero.

#### 2.5.- Campos de bombeo

Si en un acuífero se establecen varias captaciones de agua, éstas se influyen unas a otras, ya que el descenso en cualquier punto de un acuífero es la suma de descensos provocados en él por cada uno de los pozos considerados individualmente. El efecto de la presencia de varios pozos en un acuífero se traduce, en que en cualquier pozo, para extraer un determinado caudal, es preciso elevar el agua a una mayor altura que si estuviese él solo. Esto crea un consumo adicional de energía de modo que realmente el establecimiento de un nuevo pozo en un campo de bombeo perjudica económicamente a los otros pozos existentes. Si el acuífero es libre, todo descenso de nivel equivale a una disminución del espesor de acuífero saturado y, por lo tanto, de la transmisividad. Así entonces, el establecimiento de nuevos pozos en un acuífero libre perjudica, además, el caudal de los pozos existentes.

#### 2.6.- Efectos de los límites de los acuíferos

Si el cono de descensos de un pozo alcanza un borde impermeable del acuífero, no puede extenderse en esa dirección y, por lo tanto, los descensos entre el pozo y el borde han de ser mayores y más rápidos para poder proporcionar el agua que, de otro modo, hubiese sido suministrada por la extensión del cono más allá del borde en cuestión. Si el borde no es del todo impermeable, el

efecto es algo más amortiguado y el cono puede extenderse algo más allá del borde. De forma similar, si el cono de descensos de un pozo alcanza un borde capaz de mantener el caudal constante, por ejemplo un río, un lago o el mar, el cono tampoco puede rebasar ese borde, pero ahora el agua necesaria para el bombeo es suministrada por el citado borde y los descensos se estabilizan rápidamente.

Si el borde de potencial constante no es capaz de suministrar toda el agua necesaria, los niveles no se estabilizan y el cono rebasa el borde, pero los descensos se producen ahora más lentamente. Un efecto resultante es similar al producido por un aumento de la transmisividad del acuífero. En un mismo campo de bombeo pueden coincidir varios tipos de bordes o barreras (se llaman barreras negativas a los bordes impermeables y barreras positivas a los de potencial constante), y entonces el efecto que se tiene es la combinación de efectos según como el cono de descenso vaya alcanzando los distintos bordes.

El efecto de extraer agua de masas de agua superficial por bombeo en acuíferos directamente relacionados con éstas, es llamado recarga inducida (fig. 36). y tiene gran interés, puesto que el agua del río o lago para llegar al pozo, debe hacer un recorrido más o menos largo por el acuífero, con el consiguiente efecto de filtrado.

#### IV.3.- ALTERNATIVAS DE SOLUCION

##### 3.1.- Fórmulas básicas

Considerando que el flujo es laminar, sin variación en la fuerza de inercia, la ley fundamental del movimiento es la de Darcy:

$$v = -k * \text{grad } h.$$

siendo:

v = velocidad de flujo = velocidad real \* porosidad.

k = permeabilidad.

h = nivel piezométrico.

la combinación de la ecuación de continuidad con la ley de Darcy en dos dimensiones permite llegar a:

$$\nabla^2 h + F / T = S / T * \partial h / \partial t$$

donde:

$\nabla^2 h$  = operador de laplace.

F = aporte de agua por unidad de tiempo y por unidad de volumen del acuífero.

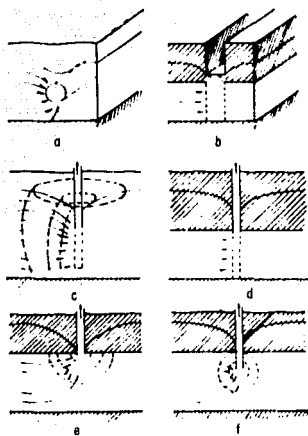
S = coeficiente de almacenamiento

T = transmisividad.

t = tiempo.

Se trata de una ecuación diferencial lineal de segundo orden en derivadas parciales.

En la fig. 37 se indica el tipo de flujo creado en las proximidades de varios tipos de captaciones y cuya consideración simplifica mucho el planteamiento de los problemas.



- a) Flujo plano bidimensional
- b) Flujo plano horizontal unidimensional
- c) Flujo radial bidimensional
- d) Flujo radial horizontal unidimensional
- e) Flujo esférico unidimensional en las proximidades
- f) Flujo esférico bidimensional en las proximidades

Fig. 37.- Tipo de flujo creado por captaciones.

### 3..2.- Métodos de solución

El estudio cuantitativo de los fenómenos naturales se realiza mediante el establecimiento de leyes que se aproximan y representan lo que sucede en realidad : estas leyes conducen al establecimiento de una ecuación matemática más o menos completa, en la que, además de las diferentes variables y cantidades que intervienen y controlan el fenómeno, aparecen con frecuencia sus derivadas.

Dentro de los métodos de solución se pueden mencionar:

Método de separación de variables.

Método de las transformadas integrales lineales.

Transformadas de Laplace.

Transformadas finitas de Fourier.

Método de superposición.

Método de las imágenes.

Método de las funciones de Green.

Métodos numéricos y gráficos de resolución.

De estos métodos los más utilizados son : el método de separación de variables, método de superposición, y el método de las imágenes, los cuales se explicarán más ampliamente a continuación.

#### 3.2.1.- Método de separación de variables

Algunas veces puede intentarse buscar soluciones de variables separadas. Así puede tratarse de encontrar soluciones del tipo :

$$h(x, y, z) = X(x) + Y(y) + Z(z) = 0$$

para resolver la ecuación:

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

que debe de cumplir:

$$\nabla^2 h = \frac{d^2 x}{dx^2} + \frac{d^2 y}{dy^2} + \frac{d^2 z}{dz^2} = 0$$

y como cada sumando del segundo miembro depende sólo de una variable, cada uno de ellos debe de ser constante si el problema es estacionario.

Así:  $\frac{d^2 x}{dx^2} = a_0$  ;  $X(x) = a_0 x^2 + a_1 x + a_2$

y similarmente :  $Y(y) = b_0 y^2 + b_1 y + b_2$

$Z(z) = c_0 z^2 + c_1 z + c_2$

con la condición:

$$a_0 + b_0 + c_0 = 0$$

En otras ocasiones se trata de buscar una solución tipo:

$$a_0 h_1 + a_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} + a_2 \frac{\partial h_1}{\partial y} + a_3 \frac{\partial h_1}{\partial z} = f(x, y, z)$$

$$a_0 h_2 + a_1 \frac{\partial h_2}{\partial x} + a_2 \frac{\partial h_2}{\partial y} + a_3 \frac{\partial h_2}{\partial z} = f(x, y, z)$$

Siendo  $a_0, a_1, a_2, a_3$  constantes y  $f_1$  y  $f_2$  funciones de  $x, y, z$ .

La función  $h = c_1 h_1 + c_2 h_2$  ( $c_1$  y  $c_2$  = constantes arbitrarias) es también solución y cumple la condición de contorno:

$$a_0 h + a_1 \frac{\partial h}{\partial x} + a_2 \frac{\partial h}{\partial y} + a_3 \frac{\partial h}{\partial z} = c_1 * f_1 + c_2 * f_2$$

Esta propiedad permite resolver algunos problemas de contorno por correlación de otros problemas de contorno más sencillos convenientemente seleccionados.

Sea el caso de ecuaciones parabólicas del tipo:

$$v^2 h + f(x, y, z, \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z}, \frac{\partial h}{\partial t})$$

Tal como la del flujo sin manantiales en régimen no estacionario:

$$v^2 h = a \frac{\partial h}{\partial t}$$

y sean  $h_1$  y  $h_2$  dos soluciones particulares, tales que cumplen las siguientes condiciones de contorno:

$$L(h_1) = 0 \text{ y } L(h_2) = f_2(x, y, z)$$

en el contorno, siendo la función  $L(h)$  del tipo:

$$L(h) = a_0 h + a_1 \frac{\partial h}{\partial x} + a_2 \frac{\partial h}{\partial y} + a_3 \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$h(x, y, z) = X(x) * Y(y) * Z(z) = 0$$

que debe cumplir



$$\nabla^2 h = X(x) \cdot Y(y) \cdot Z(z) \cdot \left( \frac{1}{x} \frac{d^2 x}{dx^2} + \frac{1}{y} \frac{d^2 y}{dy^2} + \frac{1}{z} \frac{d^2 z}{dz^2} \right) = 0$$

lo que exige que cada sumando bajo el paréntesis sea constante así:

$$X(x) = \exp(\pm ax)$$

$$Y(y) = \exp(\pm by)$$

$$Z(z) = \exp(\pm cz)$$

con la condición:

$$a^2 + b^2 + c^2 = 0$$

Los valores de  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , son unos reales y otros imaginarios, o bien números complejos; de ahí que las soluciones se transforman en funciones trigonométricas hiperbólicas.

### 3.2.2.-Método de superposición

Las ecuaciones lineales, como por ejemplo:  $\nabla^2 h = 0$ , tienen como propiedad el principio de la superposición o de la aditividad de soluciones. Si  $h_1$  y  $h_2$  son dos soluciones particulares:

$$h = c_1 h_1 + c_2 h_2, \text{ siendo } c_1 \text{ y } c_2 \text{ constantes arbitrarias.}$$

Sea el caso de ecuaciones elípticas del tipo:

$$\nabla^2 h = f(x, y, z, \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z})$$

y sean  $h_1$  y  $h_2$  dos soluciones analíticas que cumplen las siguientes condiciones de contorno y las condiciones en el origen ( $t=0$ ):

$$h_1 = F(x, y, z) ; \quad h_2 = 0$$

la ecuación  $h = h_1 + h_2$  es también solución en las condiciones de contorno  $L(h) = f(x, y, z)$  e iniciales en  $t=0$ ,  $h = f(x, y, z)$ .

### 3.2.3.- Método de las imágenes

Este método es extraordinariamente fructífero en la hidráulica subterránea, porque permite transformar, en ciertas condiciones, un medio con fuentes y/o sumideros puntuales y limitado en otro medio, también con fuentes y/o sumideros puntuales, pero no limitado.

Sea un sistema  $\Sigma$  de fuentes y sumideros con  $Q_i(x_i, y_i, z_i)$  en un medio homogéneo e isotrópico  $D$ , limitado por una superficie  $S$  (con flujo en dos dimensiones, en el plano  $xy$ ); sea  $\Sigma'$  otro sistema de fuentes y sumideros  $(x_i', y_i', z_i')$  en un medio homogéneo e isotrópico  $D'$  al otro lado de  $S$ . Si al considerar el sistema de fuentes y sumideros  $(\Sigma + \Sigma')$  en el espacio  $(D + D')$  resulta que  $S$  es una superficie o línea de corriente, se observa que el sistema  $\Sigma'$  es imagen en  $S$  de  $\Sigma$ , y el sistema  $\Sigma$  limitado se puede sustituir por  $\Sigma + \Sigma'$  ilimitado. Si  $S$  resulta ser una superficie equipotencial del sistema  $\Sigma'$  es imagen conjugada de  $\Sigma$  en  $S$  y similarmente el sistema  $\Sigma$  limitado se puede sustituir por el sistema  $\Sigma + \Sigma'$  ilimitado.

Un caso interesante es cuando se tiene un sistema  $\Sigma$  limitado por una barrera impermeable, cuya fuente puntual es  $Q_i$  para  $x > 0$  (fig. 38-a); considerando otro sistema  $\Sigma'$  cuya fuente es similar a la anterior  $Q_i' = Q_i$ , se observa en el plano de contorno el reflejo de  $x_i' = x_i$ ,  $y_i' = y_i$ ,  $z_i' = z_i$ , en donde el sistema  $\Sigma'$  es también la imagen espectral respecto al plano del sistema  $\Sigma$ , conservando los signos, por lo que el sistema limitado puede ser sustituido por  $(\Sigma' + \Sigma)$ .

En el caso de que el plano  $S$  en  $x=0$  separe dos medios isotrópicamente homogéneos de diferente conductividad hidráulica  $k_1$ ,  $k_2$  (fig. 38-b) y se tiene una fuente puntual en  $k_1$ , el efecto en este medio equivale a la suma de efectos de la fuente en  $k_1$ , cuya intensidad es  $Q_1(x_i, y_i, z_i)$ , producida en un punto  $P_1$  con una potencia  $q_1$  igual a la producida y de otra fuente simétrica respecto a la frontera de intensidad  $Q_1(x_i, y_i, z_i)$  en  $k_2$  para un punto  $P_2$ . El efecto en este medio equivale al de una fuente situada en la misma posición que la fuente  $k_1$  pero de intensidad diferente  $Q''$ .

$$e_1 = -Q/4\pi k_1 r - Q'/4\pi k_1 r'' ; e_2 = -Q''/4\pi k_1 r''$$

a las condiciones de :

$$x = 0, e_1 = e_2 ; k_1 e_1 x = k_2 e_2 x ; q(x)_1 = q(x)_2$$

se obtiene :

$$Q'/Q = (k_1 - k_2)/(k_1 + k_2) ; Q''/Q = 2k_1/(k_1 + k_2)$$

donde:

$$Q'' = Q' + Q$$

Esta ecuación sólo es válida para flujo en dos dimensiones.

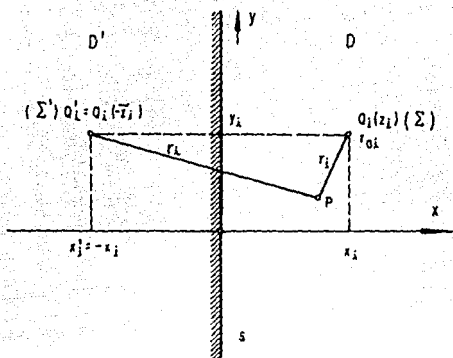


Fig 38-a Sistema limitado por una barrera impermeable

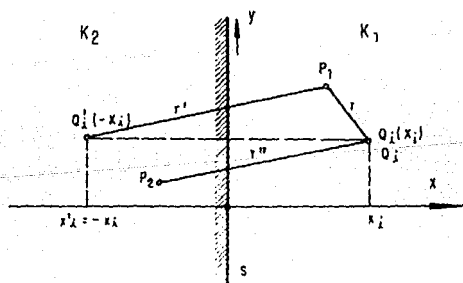


Fig 38-b Sistema formado por dos medios isotrópicamente homogéneo con diferentes conductividades hidráulicas

#### IV.4.- SOBREEXPLOTACION Y HUNDIMIENTO

##### 4.1.- Antecedentes

En México, la importancia del agua subterránea se deriva principalmente de condiciones climatológicas adversas; en más del 50% del territorio nacional, donde impera un clima desértico o semidesértico, el recurso hidráulico es escaso y transitorio en la superficie; consecuentemente, el subsuelo es la principal y frecuentemente la única fuente de abastecimiento. Pero el agua subterránea no sólo es vital en las zonas áridas, también reviste gran importancia en las regiones de clima favorable.

La explotación de las fuentes subterráneas en gran escala no es muy antigua en este país. Hasta hace unas cuatro décadas la agricultura era raquítica y poco tecnificada, el desarrollo industrial incipiente; y las ciudades, relativamente poco pobladas. Las necesidades de agua eran poco cuantiosas y casi siempre las fuentes locales tenían capacidad suficiente para satisfacerlas; el agua subterránea se explotaba en pequeña escala mediante captaciones rudimentarias. De entonces a la fecha, el país experimentó un rápido desarrollo; floreció la agricultura, la industria cobró importancia y se aceleró el crecimiento demográfico en forma explosiva. Para sustentar este desarrollo, el aprovechamiento de los recursos hidráulicos tuvo que progresar al mismo ritmo; en particular, las fuentes subterráneas cobraron importancia en pocos años, hasta convertirse en factor determinante del desarrollo en todos sus sectores.

Por su permanencia y calidad, el agua subterránea es preferentemente utilizada para abastecimiento de los núcleos de población y de las industrias, además de ser un valioso auxiliar en las zonas agrícolas sustentadas por fuentes superficiales.

#### 4.2.- Importancia del agua subterránea

El progreso de la agricultura en México está condicionado principalmente a la disponibilidad del recurso hidráulico subterráneo, ya que son contados los proyectos viables de riego en gran escala basados en el aprovechamiento de corrientes superficiales.

Por su permanencia, amplia distribución y menor exposición a la contaminación, el agua del subsuelo es, en general, la más idónea para consumo humano; todas las capitales de los estados del país y la gran mayoría de las poblaciones se abastecen mediante pozos.

El abastecimiento de agua, de la gran mayoría de los complejos industriales depende de los acuíferos. Las necesidades de agua de la población rural son satisfechas mediante captaciones subterráneas.

#### 4.3.- Problemática en el aprovechamiento del agua subterránea

Actualmente, la problemática del agua subterránea plantea tres aspectos principales: sobreexplotación, contaminación y uso competitivo.

##### 4.3.1.- Sobreexplotación

En la época en que se inició el aprovechamiento de los acuíferos a gran escala, prácticamente se carecía de estudios acerca de sus características y renovación. Este desconocimiento dio lugar a que se sobreestimara el recurso hidráulico disponible en el subsuelo; y así, bajo la presión de las necesidades de agua, se inició la sobreexplotación de algunos acuíferos.

El descenso progresivo de los niveles del agua fue el efecto inmediato, de éste se derivaron: el incremento de los costos de bombeo, la inutilización de captaciones y la disminución de su rendimiento, la intrusión salina de los acuíferos costeros, la formación de grietas, el asentamiento del terreno, daños ecológicos, etc.

#### 4.3.2.- Contaminación

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

#### 4.3.3.- Uso competitivo

La escasez del recurso en relación con su creciente demanda ha originado una competencia destructiva entre los diferentes sectores por su aprovechamiento prioritario.

Por ejemplo: para el consumo humano, su uso es de primera necesidad; las ciudades están acaparando las fuentes de agua circunvecinas para su abastecimiento, con frecuencia a costa de la agricultura; el desarrollo industrial, preferentemente establecidos en las proximidades de los grandes asentamientos humanos, están complicando el abastecimiento de agua; la explotación intensiva de los acuíferos para abastecer los grandes desarrollos, esta interfiriendo o agotando a las captaciones del sector rural desarrollándose unos sectores a costa de otros, o bien todos prosperan temporalmente a costa de un recurso agotable.

#### 4.4.- Componentes y manejo del agua subterránea

##### 4.4.1.- Componentes del agua subterránea

El agua subterránea esta constituida por dos componentes principales: el volumen renovable (recarga estacional del acuífero) y el volumen no renovable (almacenamiento del acuífero); el manejo de ambas depende entre otras cosas de la existencia o falta de fuentes alternativas que permitan el uso de los recursos hidráulicos existentes.

##### 4.4.2.- Manejo del agua subterránea

El manejo del agua subterránea tiene por objeto regular la explotación, el uso y aprovechamiento de este recurso, considerando su interdependencia con el agua superficial, a fin de satisfacer las distintas demandas de agua a corto, mediano y largo plazo.

En la actualidad la tendencia en el manejo de acuíferos, se enfoca a determinar niveles máximos y mínimos del agua, con el fin de regular la capacidad de su almacenamiento, coadyuvando con esto al desarrollo de actividades económicas que de otra manera no podrían realizarse.

Dentro de este planteamiento siempre debe tenerse en mente los efectos que podrían generarse en el comportamiento de los acuíferos, a fin de evitar que se lleguen a producir colapsos económicos al no poder restituir las condiciones originales, con la que se inició la explotación del agua subterránea.



El manejo de agua subterránea que hasta la fecha se ha hecho en México, responde, además de las diversas condiciones físicas del medio (clima, hidrología, geología, etc.), a las presiones socioeconómicas producidas por el mismo desarrollo.

#### 4.5.- Sobreexplotación de acuíferos en México

Debido a la perforación desmesurada de pozos, que provocó la extracción de grandes volúmenes de agua subterránea, en México existen más de treinta acuíferos con sobreexplotación (ver fig. 39), lo que ha llevado a realizar el inventario de los recursos hidráulicos subterráneos a través de estudios en los que se está aplicando la tecnología del agua subterránea moderna. Dichos estudios iniciaron propiamente a partir del año de 1968, contándose a la fecha con más de 200 estudios a detalle, cuyos resultados apoyan a estudios regionales que cubren aproximadamente un 70% del área del país, siendo posible ahora implantar políticas de explotación que lleven al aprovechamiento del agua subterránea en forma racional mediante un manejo adecuado de la misma.

#### 4.6.- Soluciones a los problemas generados por la sobreexplotación

Para que no progresen los problemas generados por la sobreexplotación se dan las siguientes soluciones:

- a) Proveer elementos técnicos e institucionales para regular las aguas subterráneas.
- b) Aplicar técnicas para el uso eficiente de las aguas superficiales y subterráneas.
- c) Reducción de las extracciones hasta un volumen del orden de la extracción permanente

Extracción permanente = rendimiento seguro o recarga aprovechable, que se define como el máximo volumen de extracción que no produce abatimiento residual, ni daños irreparables al acuífero.

- d) Aplicación de medidas correctivas como vedas rígidas, que no permitan el incremento de las extracciones en los aprovechamientos existentes, ni perforación de nuevos pozos.
- e) Redistribución de las captaciones para reducir la velocidad de abatimiento.
- f) Incremento de la recarga mediante la infiltración artificial.
- g) Importación de agua desde cuencas vecinas.
- h) Relocalización de captaciones a distancias mayores del litoral en caso de acuíferos costeros.
- i) Uso de modelos de predicción del comportamiento de los acuíferos; ya que plantean alternativas de explotación de forma más conveniente tanto en el aspecto geohidrológico como económico.
- j) Realizar campañas de concientización, para que se le dé un real uso eficiente al agua.

#### 4.7.- Disposiciones Institucionales referentes al agua subterránea

En general, el agua se reglamenta en el país de la siguiente forma:

- a) El agua es propiedad de la nación.
- b) El organismo regulador respecto a la explotación uso y aprovechamiento del agua es la SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidraulicos).
- c) Llevar un registro permanente del agua subterránea para su explotación.
- d) Se decretan zonas de veda que se reglamentarán para el control de la extracción y utilización del agua del subsuelo, debiéndose instalar medidores y demás accesorios, para determinar gastos, volúmenes y niveles.
- e) Las zonas de veda se reglamentarán para fijar los volúmenes de extracción que se autoricen, así como las disposiciones que se requieran.
- f) Realización de obras de recarga artificial en los acuíferos en que sea factible, y que así lo requieran.

g) Establecimiento de medidas para preservar la calidad del agua subterránea.

#### 4.8.- Hundimiento

Se entiende como hundimiento a la subsidencia del terreno, cuando los niveles piezométricos se abaten por el excesivo bombeo de los acuíferos. Este abatimiento de presión en los acuíferos provoca flujo de agua de los mantos arcillosos hacia ellos con la correspondiente consolidación de las arcillas acompañada de pérdida de volumen. En el caso de la Ciudad de México, el hundimiento ocurre como una función lineal del tiempo pero es muy variable de un punto a otro de la ciudad, por lo que es muy difícil hablar de una cifra representativa del hundimiento anual que varía entre 5 y 20 cm/año, llegando en ocasiones a tener valores mayores. Por lo que los estratos arcillosos que se encuentran a profundidades menores de 50 mts. son los principales responsables del fenómeno; particularmente los comprendidos entre los 20 y los 50 mts. de profundidad.

La compactación y el fracturamiento del terreno produce graves daños a estructuras, redes hidráulicas e instalaciones subterráneas. Los cambios en la estructura del subsuelo causados por el fracturamiento pueden comunicar zonas de agua de mala calidad, poniendo en peligro la calidad de ésta.

El fenómeno del hundimiento, basado en la teoría de la consolidación de Terzaghi se representa en la (fig.40), para el caso de un solo estrato de arcilla, drenado por la parte superior e inferior sometidos a un abatimiento rápido de la presión del agua constante con el tiempo y suponiendo que el nivel freático se mantiene a la misma profundidad durante el proceso de consolidación. Este estrato de arcilla es homogéneo, de espesor  $H$  y la pérdida de presión  $\Delta p$  ocurre en el acuífero permeable inferior.

Antes de que se produzca el abatimiento  $\Delta p$  en el acuífero las presiones estaban en (a) de la fig. 40, que corresponde a la configuración hidrostática de equilibrio, al producirse el abatimiento, el proceso de consolidación comienza y en (b) de la misma fig. se ve la distribución de presiones en el agua en un instante intermedio t. En (c), al final del proceso, la distribución vuelve a ser lineal.

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

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

donde :

n = es la serie de los números naturales.

e = la base de los logaritmos.

T = factor de tiempo.

Cv = coeficiente de consolidación.

H = espesor del estrato de arcilla.

av = coeficiente de compresibilidad.

La expresión anterior sólo toma en cuenta las deformaciones del suelo causadas por consolidación primaria, en el valle de México la consolidación secundaria es de escasa significación, así que hay razón para pensar que en las arcillas de México la consolidación secundaria no invalidará la ecuación anterior que la ignora.

- 1 VALLE PESCADORES
- 2 VALLE TODOS SANTOS
- 3 VALLE LA PAZ
- 4 VALLE SANTO DOMINGO
- 5 VALLE EL VEICENRO
- 6 VALLE SAN QUINTIN
- 7 VALLE DE MANAÑERO
- 8 VALLE DOS REÑEROS
- 9 VALLE REAL DEL CASTILLO
- 10 VALLE LAS PALMAS
- 11 VALLE DE MEXICALY
- 12 MESA ARENOSA DE SAN LUIS
- 13 COYOTE COSTA
- 14 VALLE BISHOP
- 15 PITIQUITO-COAHUILA
- 16 VALLE EL SAMUJRAL
- 17 COSTA DE MICHUJILLO
- 18 SAN JOSÉ GUAYMAL
- 19 VALLE DE GUAYMAL
- 20 BARRERAS IZQUIERDA DEL RIO SINALOA
- 21 VALLE DE JUAREZ
- 22 VALLE VILLA AMULIADA
- 23 VALLE DE JAMOS
- 24 CASAS GRANDES
- 25 VALLE ALDAMA
- 26 VALLE JIMENEZ CAMARGO
- 27 COMARCA LAGUNERA
- 28 VALLE CALERA
- 29 VALLE DE LOBATO
- 30 VALLE DE LEÓN
- 31 ZONA DE LAGUNA SECA
- 32 BAJO CELAYA
- 33 VALLE DE OUBELTARD
- 34 VALLE DE TOLUCA
- 35 VALLE DE MEXICO
- 36 MONTERREY, N.L.

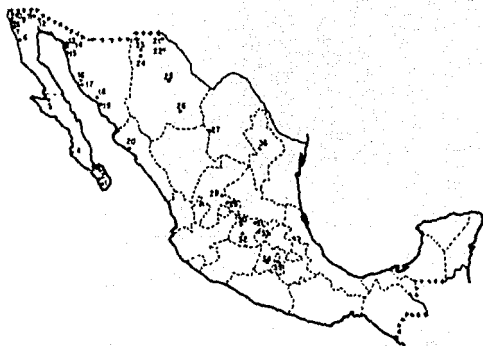


Fig 39. Zonas con problemas de explotación excesiva del agua subterránea en la República Mexicana.

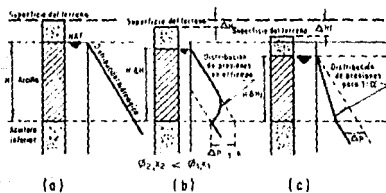


Fig 40. Distribución de presión neutral en un estrato de arcilla con un abatimiento  $\Delta P$  constante en el acuífero que sirve de frontera interior. NAF en la frontera superior del estrato arcilloso,  $H$  espesor de la arcilla  $\Delta H$  hundimiento final del estrato.

#### IV.5.- INTRUSION SALINA Y CONTAMINACIÓN

##### 5.1.- Intrusión Salina

En México se dispone de una gran longitud de costas, y en algunas partes de éstas, el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento para la población, agricultura e industria. Ello origina una importante extracción, y por lo tanto, una sustancial modificación del balance hidrodinámico natural. Tal es el caso del acuífero costero en Guaymas, Sonora.

El valle de Guaymas tiene una recarga media anual de aproximadamente  $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ , contra una extracción estimada en  $179 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; este desequilibrio ha causado un abatimiento de 2 mts. anuales en los niveles del agua y un desarrollo muy importante de la intrusión del agua marina en la parte costera del valle.

##### 5.2.- Definición

Se llama intrusión del agua salada o marina al movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce.

Esta intrusión se presenta generalmente formando una "cuña", como se muestra en la fig. 41.

Si además se sitúa un pozo por encima de la cuña de agua salada, el efecto de la extracción de agua dulce en este pozo dará lugar a la formación de un "cono" de agua salada, el cual hará que la contaminación del agua del pozo sea más rápida. Esto se ilustra en la fig. 42.

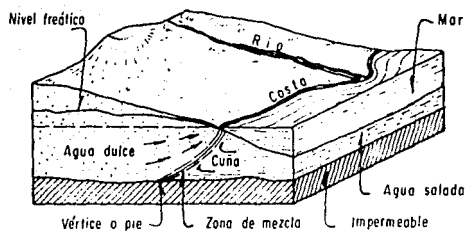


Fig 41.-Cuña de agua salada en un acuífero costero

### 5.3.- Frontera abrupta y frontera de difusión

Cuando una formación contiene dos fluidos inmiscibles en contacto, la interface tiene una orientación y profundidad que guarda relación con la velocidad y dirección del movimiento, con el potencial hidráulico y con la densidad de cada uno de los fluidos. En este caso se dice que se presenta una "frontera abrupta".

Si esos dos líquidos son miscibles, tales como el agua dulce y el agua salada, no existe una interface brusca, sino que se pasa de un líquido a otro a través de una zona de mezcla o de difusión. Esta es una frontera de "transición", cuya anchura depende de la "difusión" y "dispersión" que se presenta en el medio poroso.

### 5.4.- Difusión y dispersión

La difusión se refiere a la expansión y dilución de un fluido en otro cuando son miscibles y de diferente o igual densidad. Este es un proceso producido por la agitación molecular de los líquidos a consecuencia de su temperatura. Se puede ejemplificar sencillamente considerando la difusión que sufre una gota de tinta en un recipiente con agua en reposo: la mancha producida va aumentando progresivamente, al mismo tiempo que se va diluyendo.

La dispersión por su parte se refiere a la desviación del flujo de una sustancia a causa del irregular acomodo de los granos y la consiguiente tortuosidad de la trayectoria formada por los poros comunicados. Las partículas de dicha sustancia tienen que moverse a través del medio por diferentes caminos que dejan los granos o las grietas del material (ver fig. 43).



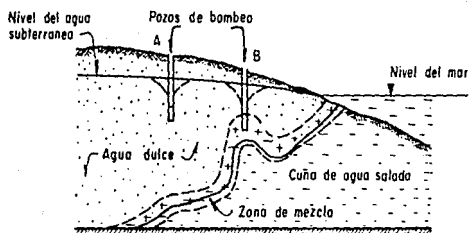


Fig 42.-Formación de conos de agua salada debajo de captaciones.  
 ( El pozo A no se contamina , pero el B sí )

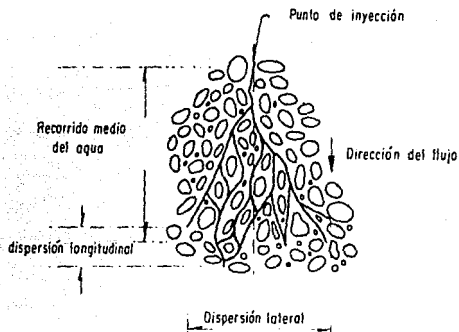


Fig 43.- Dispersión hidrodinámica

El conocimiento de los fenómenos de difusión y dispersión de una sustancia en un medio poroso, es básico en los estudios relacionados con la recarga artificial, contaminación, intrusión salina, etc. para determinar el grado de mezcla que se tiene en cada caso.

#### 5.5.- Propiedades del agua marina

El peso específico del agua marina es mayor que el del agua dulce y puede tomarse entre 1.020 y 1.030 gr/cc, según la salinidad y temperatura, siendo el valor más usual el de 1.025 (para 1990 ppm de ion cloro, equivalentes a 35 gr/lit de sales disueltas).

La viscosidad del agua marina es del orden de un 30% mayor que el agua dulce a igual temperatura.

#### 5.6.- Posición de la cuña de agua salada

##### 5.6.1- Fórmula de Ghyben - Herzberg.

Se basa en el equilibrio estático de columnas de agua de diferente densidad (ver fig.44).

Las hipótesis básicas admitidas son:

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

En estas condiciones, en un punto A cualquiera de la interfase, debe equilibrarse la presión del agua dulce y del agua salada por lo que:

Igualando presiones:  $(P = \gamma h)$

$$(h + z) \gamma_d = z \cdot \gamma_s$$

Despejando z:

$$z = \left( \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \right) h = \left( \frac{1.00}{1.025 - 1.00} \right) h = \frac{1}{0.025} h = 40h$$

Esto quiere decir que la interface se sitúa a una profundidad bajo el nivel del mar igual a 40 veces la cota del agua dulce sobre el nivel medio del mar en aquel punto.

#### 5.6.2.- Modificación de Hubbert

Cerca de la costa existe un aumento de la velocidad del agua dulce, debido a que la presencia de la cuña de agua salada disminuye el área de flujo. Este fenómeno no es considerado por Ghyben - Herzberg, quienes suponen flujo horizontal.

La corrección de Hubbert a la ley de estos autores es tomar como cota del agua dulce la que le corresponde al potencial sobre el punto A que está en la interfase. Con esto, se obtienen profundidades de la interfase mayores que las calculadas con la ecuación de Ghyben - Herzberg sin corrección.

Las ecuaciones anteriores son válidas para todo tipo de acuíferos sin más modificación que considerar niveles piezométricos en lugar de niveles freáticos.

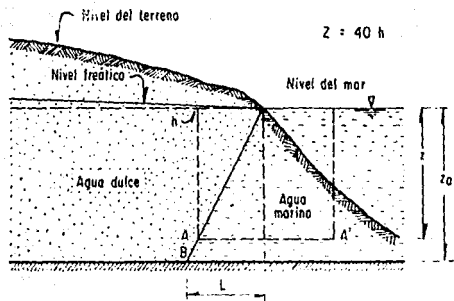


Fig 44 Equilibrio del agua dulce y el agua marina en una zona costera de acuerdo con los supuestos básicos de Ghyben-Herzberg

## 5.7.- Métodos de prevención y control

Se citarán a continuación los seis métodos más generales explicando sólo los menos obvios.

- 1) Disminución del bombeo.
- 2) Reubicación de los centros de bombeo.
- 3) Recarga artificial.

En este método, el agua de recarga puede proceder de: filtración de agua retenida de ríos y torrentes, de agua traída por canales desde otras cuencas u otros puntos de éstas, o del agua procedente del tratamiento de aguas residuales.

- 4) Barreras hidráulicas de inyección.

En lugares cercanos a la costa, inmediatamente encima de la cuña de agua salada, se inyecta o se hace filtrar agua dulce para equilibrar la presión que ejerce el agua salada y así impedir su avance (ver fig. 45 ).

- 5) Barreras físicas.

Consiste en inyectar arcillas, cemento, asfalto u otras sustancias químicas a presión.

- 6) Depresión de bombeo.

Se establece una línea de bombeo dentro de la cuña salina a lo largo de la costa tal que intercepte todo el flujo de agua salada hacia el interior (ver fig. 46).

## 5.8.- Contaminación

### 5.8.1.- Definición

La contaminación del agua subterránea es el proceso mediante el cual se altera la calidad de ésta, de tal forma que

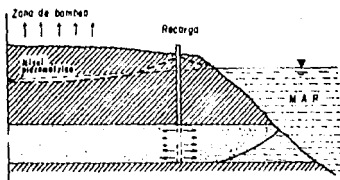


Fig. 45.- Barrera hidráulica de inyección en un acuífero confinado.

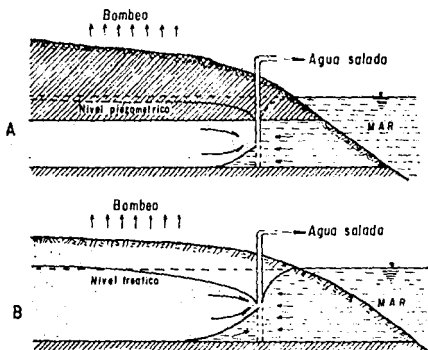


Fig. 46.- Establecimiento de una depresión de bombeo.

A) En acuífero cautivo

B) En acuífero libre

no puede ser ingerida por el hombre por afectar a su salud, o dicha alteración la imposibilita además para otros usos en la agricultura, ganadería, industria, etc.

Los acuíferos por la lenta circulación del agua, capacidad de absorción de los terrenos y pequeños espacios de los poros, pueden tardar mucho en mostrar la contaminación y presentan un notable poder depurador frente a muchos agentes contaminantes, aunque dicho poder depurador tiene un límite.

Sin embargo, a diferencia de la contaminación en aguas superficiales, al no ser visibles éstas y estar su explotación muy distribuida, la acción protectora o atenuadora del efecto de la contaminación con frecuencia llega tarde y a veces no llega a producirse. Además, cuando la contaminación se hace perceptible, usualmente ya ha alcanzado un importante desarrollo en su extensión.

#### 5.8.2.- Causas de la contaminación.

El aumento de población es una de las causas del paralelo incremento de la contaminación, ya que el agua de los abastecimientos públicos utilizada para fines domésticos, supone la evacuación prácticamente del mismo volumen, pero con sus características alteradas.

La evolución del nivel de vida supone también un aumento del consumo por persona y por consiguiente de los caudales vertidos de aguas residuales, en los que se introducen cada vez más sustancias extrañas y de difícil depuración.

El desarrollo de los países, siguiendo el de su industrialización, requiere grandes cantidades de agua y su utilización para sus distintas actividades mineras, metalúrgicas, químicas etc., supone la inclusión en las aguas vertidas de elementos extraños.

Las escombreras y vertederos de basura son, así mismo, focos de posible contaminación, al arrastrar la lluvia en forma superficial o filtrándose a través del suelo, ciertos elementos solubles que se incorporan al agua existente.

Los fertilizantes usados en la agricultura introducen, entre otros elementos, fósforo y nitrógeno, que favorecen la proliferación de algas.

Los insecticidas y herbicidas constituyen otro gran riesgo para el agua subterránea. Recientemente se están estudiando con gran detalle los efectos de la acumulación del DDT y otros insecticidas clorados, habiéndose prohibido su uso en muchos países.

Aún cuando no se utilicen fertilizantes ni insecticidas la agricultura afecta la calidad del agua subterránea y de los ríos que la drenan por la simple concentración de sales y por alteración de los procesos del suelo, que pueden dar origen a una elevación del contenido de nitratos.

La utilización de productos radioactivos para fines científicos e industriales, aunque estén bien controlados, son una fuente potencial de contaminación, que se hace realidad en las explosiones nucleares, al transmitir la radioactividad a la atmósfera en forma de vapor.

Otra causa muy frecuente de la contaminación del agua subterránea es la intrusión salina, explicada anteriormente.

Finalmente, se incluyen como causas de la contaminación a actividades tales como navegación y maneobreo en ríos y canales asociados con acuíferos, al realizar la limpieza de las barcasas y el vertido de aceite.



### 5.8.3.- Como se contamina un acuífero.

Dependiendo de si el acuífero es libre, confinado o semiconfinado, se presentan distintas situaciones:

#### a.) Acuífero libre.

Es fácil en este caso comprender el proceso de la contaminación, ya que los acuíferos no tienen materiales impermeables que los protejan. Con el simple hecho de que la entrada del contaminante sea posible desde el punto de vista hidráulico, se presentará la contaminación del agua subterránea. ver (fig. 47 y 48).

#### b.) Acuíferos confinados y semiconfinados.

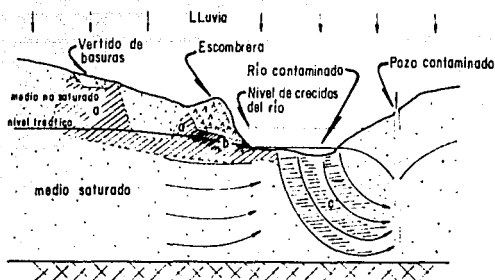
Estos acuíferos están protegidos en forma natural contra la contaminación, la cual en principio sólo puede producirse donde el acuífero pasa a ser libre (ver fig. 49).

### 5.8.4.- Procesos de transporte del contaminante.

El punto de arranque común en el desarrollo de las ecuaciones diferenciales para describir el transporte de los solutos en materiales porosos, es considerar el flujo del soluto hacia adentro y hacia afuera de un volumen infinitesimal. Aplicando el principio de la conservación de la masa para este volumen:

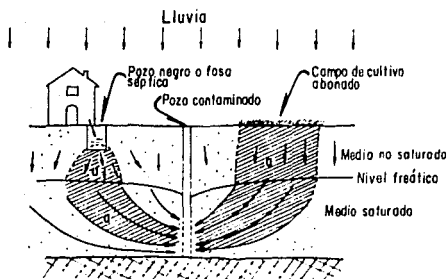
(Cambio neto de masa de soluto dentro del volumen.) = (flujo de soluto hacia afuera del elemento) - (flujo de soluto hacia adentro del elemento) ± (perdida o ganancia de masa de soluto debido a las reacciones.).

El proceso físico que controla el flujo del contaminante es la dispersión hidrodinámica. La pérdida o ganancia de masa de soluto en el volumen infinitesimal puede ocurrir como resultado de reacciones químicas o bioquímicas o por decaimiento radiactivo.



- a. Agua contaminada por infiltración de la lluvia
- b. Agua contaminada por acción de la crecida del río
- c. Infiltración de agua contaminada del río

Fig. 47.- Esquema de la contaminación de un acuífero y un pozo por acción de la lluvia sobre una escombrera y un vertido de basuras de un río sobre una escombrera y de una recarga inducida.



a) Agua contaminada

Fig. 48.- Esquema de la contaminación de un pozo en un acuífero libre por una fosa séptica y por un campo de cultivo abonado o regado con aguas residuales

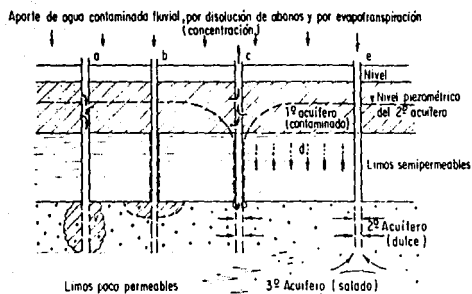


Fig 49.-Acuífero profundo contaminado por un acuífero libre de mayor potencial

La ecuación de la dispersión de un contaminante en una dimensión, para contaminantes disueltos no radioactivos en el medio poroso, el cual es homogéneo, isotrópico, y además se presenta un flujo transitorio es:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - \bar{V} \frac{\partial C}{\partial l} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

donde:

$l$  = la coordenada en dirección curvilínea tomada a lo largo de la línea de flujo.

$\bar{V}$  = velocidad lineal promedio del agua subterránea

$D$  = coeficiente de dispersión hidrodinámica a lo largo de la línea de flujo

$C$  = concentración del soluto, definida como la masa de soluto por unidad de volumen de solución.

Los efectos de las reacciones químicas, transformaciones biológicas y decaimiento radioactivo no están incluidos en esta forma de la ecuación de transporte.

El coeficiente de dispersión hidrodinámica puede ser expresado en términos de dos componentes.

$$D = \alpha \bar{V} + D^*$$

donde:

"  $\alpha$  " = una propiedad característica del medio poroso conocida como dispersividad dinámica o simplemente dispersividad, con dimensiones de (L).

"  $D^*$  " = coeficiente molecular de difusión para el soluto en el medio poroso, cuyas dimensiones son ( $L^2 / T$ ).

#### IV. 6.- SIMULACION DE ACUIFEROS

##### 6.1- Generalidades.

De lo visto en el capítulo anterior, referente al modelo conceptual de funcionamiento geohidrológico, conviene agregar que actualmente, gracias a la capacidad y rapidez de las actuales computadoras digitales, resulta más conveniente simular acuíferos por medio de modelos matemáticos, los cuales se basan fundamentalmente en el principio de conservación de la materia y la ley de Darcy. El procedimiento consiste en dividir el acuífero a modelar en elementos de acuífero, cuyo tamaño depende de el área total, de la distribución de los datos disponibles y de la magnitud y distribución de la distribución de la evolución piezométrica.

A cada elemento de acuífero se le aplica la ecuación de balance, y se ligan entre sí de manera que las condiciones de frontera de cada subzona coincidan con las de las adyacentes; la diferencia entre los volúmenes que entran y salen del elemento en cierto intervalo de tiempo, es igual al cambio de almacenamiento del elemento en el mismo intervalo.

El comportamiento del acuífero es representado por un sistema de ecuaciones, cuyas incógnitas son las elevaciones piezométricas al final de un intervalo de tiempo. Resuelto el sistema, las elevaciones obtenidas se toman como valores iniciales para el siguiente intervalo de tiempo. Posteriormente se calibra el modelo reproduciendo una evolución conocida en puntos distribuidos en el área modelada. Una vez calibrado el modelo, se procede a la predicción del comportamiento o las alternativas que se deseen estudiar. Se aplica la distribución del bombeo y se obtiene la evolución piezométrica respectiva.

##### 6.2.- Ecuación del flujo en el acuífero

La ecuación bidimensional que regula el movimiento del agua en un acuífero isótropo confinado.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = S \frac{\partial H}{\partial t} + Q \dots (1)$$

donde:

Q = recarga

T = transmisividad

S = coeficiente de almacenamiento

H = nivel piezométrico o espesor saturado en el caso de un acuífero libre

siendo T y H funciones X y Y (x, y son coordenadas rectangulares en un punto del acuífero). Esta ecuación representa el balance instantáneo de volúmenes en un elemento infinitesimal del acuífero de coordenadas x,y, en un momento dado, y está obtenida en las dos hipótesis siguientes:

(a) Se considera que las propiedades físicas del acuífero son constantes en una vertical.

(b) Se considera que las velocidades son horizontales y constantes también a lo largo de una vertical (hipótesis de Dupuit).

### 6.3.- Metodos generales de tratamiento numérico.

Las distintas metodologías de resolución numérica de este problema para efectos de modelación, se diferencian entre sí en la hipótesis de discretización del medio continuo.

En el método de diferencias finitas, se discretiza el espacio en elementos rectangulares o poligonales y se obtiene una ecuación algebraica para cada elemento, en función de la altura piezométrica en cada uno de ellos y de los contiguos, y de los

parametros fisicos del acuífero. La resolución de ecuaciones lineales algebraicas, en función de las alturas piezométricas de cada elemento, da una solución aproximada de la ecuación diferencial en una serie de puntos discretos.

Las técnicas de los elementos finitos se basan normalmente en métodos variacionales y su fundamento consiste en remplazar la ecuación diferencial del flujo por una función  $U(h)$  definida para cada elemento, donde  $h$  es función de la posición y del tiempo. La función  $h$  que minimiza a  $U(h)$  es la solución del problema. Generalmente, la zona en estudio se subdivide en elementos finitos triangulares, cuyos vértices se llaman nodos.

#### 6.4.- Planteamiento general del problema por el método de diferencias finitas

De las ecuación (1), efectuando la operación del primer miembro, se obtiene:

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = S \frac{\partial H}{\partial t} + Q \dots (2)$$

Por medio de series de Taylor se desarrolla el método de diferencias finitas de la siguiente manera:

$$f(x+\Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \dots + \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{\partial^n f(x)}{\partial x^n} \dots \dots \dots (3)$$

$$f(x-\Delta x) = f(x) - \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \dots + \frac{(-1)^n}{n!} \frac{\partial^n f(x)}{\partial x^n} \dots (4)$$

La diferencia hacia adelante, despreciando, términos con  $n \geq 2$ , se obtiene de la ecuación (3).

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} ,$$

por lo tanto:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots (5)$$

La diferencia hacia atrás, despreciando términos con  $n \geq 2$ , se obtiene de la ecuación (4).

$$f(x - \Delta x) = f(x) - \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} ,$$

$$\therefore \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad \dots\dots\dots (6)$$

La diferencia centrada se obtiene restando la ecuación (4) de la ecuación (3); también despreciando los términos con  $n \geq 2$ ,

$$f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x) = 2\Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} ,$$

$$\therefore \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad \dots\dots\dots (7)$$

Para aproximar la segunda derivada se suman las ecuaciones (3) y (4) despreciando términos con  $n \geq 2$ ,

$$f(x + \Delta x) + f(x - \Delta x) = 2f(x) + (\Delta x)^2 \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} ,$$

$$\therefore \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} = \frac{f(x - \Delta x) - 2f(x) + f(x + \Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

Las aproximaciones de las derivadas en función de "y" quedarían en forma similar a las ecuaciones (6) , (7) y (8).

De acuerdo con lo anterior, las expresiones en diferencias finitas en el punto (x,y) son:

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} = \frac{T_x(x + \Delta x, y) - T_x(x - \Delta x, y)}{2\Delta x} \quad \dots\dots\dots (9)$$



$$\frac{\partial T_y}{\partial y} = \frac{T_y(x, y + \Delta y) - T_y(x, y - \Delta y)}{2\Delta y} \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{H(x + \Delta x, y) - H(x, y - \Delta y)}{2\Delta y} \dots\dots\dots(11)$$

$$\frac{\partial H}{\partial y} = \frac{H(x, y + \Delta y) - H(x, y - \Delta y)}{2\Delta y} \dots\dots\dots(12)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{H(x - \Delta x, y) - 2H(x, y) + H(x + \Delta x, y)}{(\Delta x)^2} \dots\dots\dots(13)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{H(x, y - \Delta y) - 2H(x, y) + H(x, y + \Delta y)}{\dots\dots\dots} \dots\dots\dots(14)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{H_{t+\Delta t}(x, y) - H_t(x, y)}{\Delta t} \dots\dots\dots(15)$$

Las ecuaciones de la (9) a la (15) se sustituyen en la ecuación (2), con lo cual queda la ecuación del acuífero desarrollado mediante diferencias finitas.

Como la ecuación resultante se aplicará en cada uno de los elementos de la malla en que se ha dividido el acuífero, entonces se tendrá un sistema de ecuaciones lineales, donde las incógnitas serán los términos  $H_{t+\Delta t}(x, y)$  para cada punto  $P(x, y)$ .

#### 6.5.- Condiciones de frontera.

Al aplicar la teoría desarrollada anteriormente a un caso real, es preciso fijar las condiciones de borde que permitan la integración de la ecuación del flujo en el contorno espacial y temporal del acuífero. Las condiciones de frontera en los modelos de embalses subterráneos tienen dos aspectos que deben tratarse conjuntamente. El segundo es el tratamiento matemático simplificado que se les va a dar con el fin de incorporarlas al modelo.

### 6.5.1.- Condiciones de frontera espaciales.

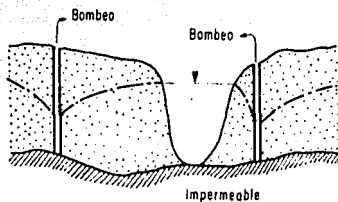
Una vez sustituido el acuífero continuo por la malla discreta elegida, hay que definir el tipo de condición de frontera impuesto a cada segmento de la línea quebrada que sustituye al contorno real del acuífero.

(a) Fronteras impermeables. Todo acuífero presenta en su contorno zonas impermeables que lo separan de los demás y permiten considerarlo como una unidad independiente. Físicamente, la existencia de una frontera impermeable implica la imposibilidad de circulación de agua a través de él. La expresión matemática del caudal en dirección de  $x$  a través de un elemento de anchura  $\Delta y$  es, según la ley de Darcy

$$Q_x = -T_x \frac{\partial H}{\partial x} \Delta y \dots\dots\dots(16)$$

siendo  $T_x$  la transmisividad del acuífero en la sección considerada. Para que  $Q_x$  sea nulo, bastará que bien la transmisividad  $T_x$  o bien el gradiente  $\partial H/\partial x$  sean nulos.

(b) Frontera de nivel constante. La existencia de lagos, embalses, ríos o incluso el mar, en contacto con el acuífero, da lugar a la presencia de fronteras en las que el nivel, va a ser constante, independiente del flujo de agua en el embalse subterráneo. Naturalmente, estos casos sólo se tienen en aquellas masas de agua suficientemente grandes para que los descensos de nivel producidos por los bombeos fueran despreciables. Además, es necesario que la masa de agua sea totalmente penetrante y que la conexión hidráulica con el acuífero sea perfecta (ver fig.50).



**Fig 50.-Efecto producido por un borde de nivel constante totalmente penetrante y con conexión hidráulica - perfecta**

(c) Fronteras de gradiente constante. Este tipo de fronteras se presenta en casos en que por razones de tamaño no es posible modelar el acuífero completo. Entonces se dan casos en que considerar gradiente constante puede ser más correcto que considerar nivel constante. Es el caso de acuíferos aluviales muy largos en que se modelan secciones independientes.

#### 6.5.2.- Condiciones de frontera temporales.

(a) Estado inicial del acuífero. Para resolver la ecuación de flujo en cada elemento, intervalo por intervalo, hay que conocer la situación inicial de los niveles del acuífero.

(b) Niveles definidos con el tiempo. Puede darse el caso de que una frontera de nivel constante (embalse, río, etc.) varíe su nivel de intervalo a intervalo según una ley fija e independiente del estado del acuífero.

#### 6.5.3.- Caudales prefijados

Son caudales de este tipo las infiltraciones constantes y conocidas procedentes de canales, ríos, etc. los bombeos (conocidos, si se simula un período histórico, o supuesto si se está tanteando una explotación futura).

## **CAPITULO V**

### **" SITUACIÓN DE LA GEOHIDROLOGÍA EN MÉXICO "**

## V.1.- INTRODUCCION.

El subsuelo constituye un depósito natural de agua, mejor y mucho más grande que el logrado por las obras de ingeniería hechas para el almacenamiento del agua en la superficie. La importancia del agua subterránea es indiscutible, gracias a ella muchas regiones del globo han podido ser habitadas; en la actualidad el agua subterránea es determinante en el desarrollo de una región, por tal motivo es de imperiosa necesidad el estudio y la investigación de esta parte de la hidrología para hacer de ella una explotación racional y provechosa.

La importancia del agua subterránea es notable en México, donde gran parte del territorio carece de aguas superficiales aprovechables debido a su régimen de lluvia; en ocasiones la necesidad del agua subterránea ha dado lugar a un aprovechamiento desmedido que puede llevar al agotamiento de los acuíferos, por lo que son necesarias medidas de protección y conservación. Dentro de la protección se incluye la explotación racional de este recurso y en la conservación se incluyen además los procedimientos para incrementar las reservas del agua subterránea, tales como la construcción de pozos de recarga, en los que el agua se mueve en dirección opuesta a los pozos ordinarios, con objeto de depositar el agua en un manto permeable y así aumentar el caudal de dichas reservas.

También se cuenta con métodos naturales que ayudan a la conservación del agua subterránea, como el de mantener donde se pueda, una cubierta vegetal con objeto de incrementar la infiltración; esto se refiere también al cuidado del suelo ya que sin él no hay vegetación, de donde se deduce que la conservación del suelo es directamente proporcional a la conservación del agua subterránea.

## V.2.- FACTORES CONDICIONANTES DE LA PRESENCIA DEL AGUA SUBTERRANEA

La presencia del agua subterránea está condicionada por ciertos factores que pueden facilitarla o impedirla. A continuación se da una descripción general de los factores en la República Mexicana, con objeto de apreciar las condiciones en que se encuentra nuestro territorio para el almacenamiento del agua en el subsuelo.

### 2.1.- Precipitación

Teniendo en cuenta que la mayor parte del agua del subsuelo proviene de la infiltración de las aguas superficiales y que éstas proceden de la precipitación, en la República Mexicana la mayor parte de la precipitación es pluvial y su distribución es bastante irregular dada la situación geográfica y orográfica del país.

Se puede decir en general de México que se tiene una menor cantidad de lluvia hacia el norte del país; una mayor cantidad de lluvia en la región del Golfo de México, debido a que ahí se acentúan más tanto los monzones, como los ciclones tropicales; en cambio en la región norte la lluvia es de menos de 500 mm. teniendo una precipitación inferior a 50 mm. en la zona del río Colorado. En el centro del país la cantidad de lluvia varía entre 500 mm y más de 1 000 mm.

En el sur y sureste de la República, donde llueve durante todo el año, la altura de lluvia llega a ser en algunos lugares superiores a 3 500 mm. En la península de Yucatán como consecuencia de su escaso relieve, la lluvia alcanza una altura aproximada de 1 000 mm anuales (Figura 51).

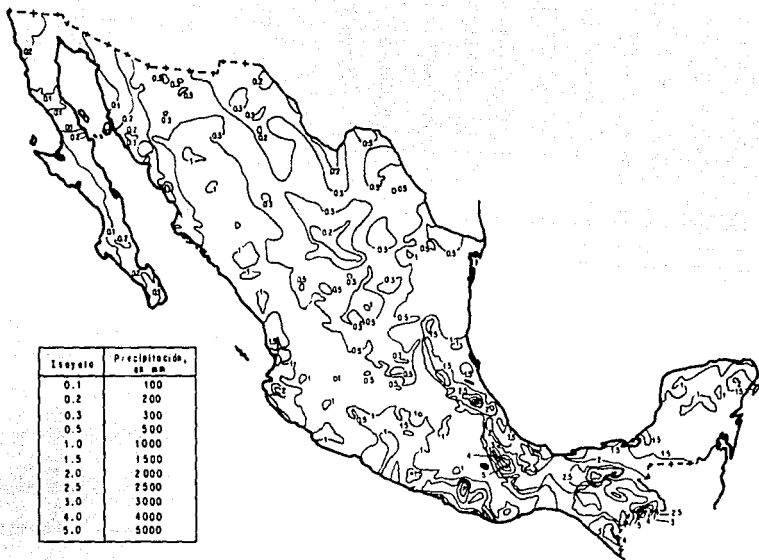


Fig 51 - Precipitación media anual en la República Mexicana



## 2.2.- Geología

El aspecto geológico desempeña un papel muy importante en la geohidrología, ya que depende de la estructura de las formaciones de rocas para que el agua pueda pasar o no al subsuelo. Las diferentes formaciones de rocas poseen ciertas propiedades que son definitivas para constituir buenos acuíferos; estas propiedades son la porosidad y la permeabilidad, no basta que las formaciones tengan un alto porcentaje de porosidad, sino además es necesario que sus poros estén intercomunicados.

Las rocas sedimentarias son las más apropiadas para ser buenos acuíferos, puesto que tienen más permeabilidad, aunque cuando se encuentran muy compactas se convierten en acuífugos, pero en general se considera a las rocas sedimentarias las de más valor geohidrológico, pudiendo ser de origen continental o de origen marino. Las regiones costeras de México pueden considerarse constituidas por material poco consolidado, su formación es principalmente de origen marino y su desarrollo tuvo lugar en el cenozoico. En estos terrenos hay depósitos aluviales, los cuales son favorables para la infiltración.

También pueden considerarse como aluviales los terrenos antes ocupados por la región lacustre de la cuenca del Valle de México. Las rocas que no poseen mucho valor geohidrológico, como son las masas ígneas y las rocas metamórficas, se localizan en la mayor parte de la península de Baja California, en regiones de la Sierra Madre Occidental, en casi toda la Sierra Madre del Sur y en la Sierra Madre de Chiapas (Figuras 52 y 53).

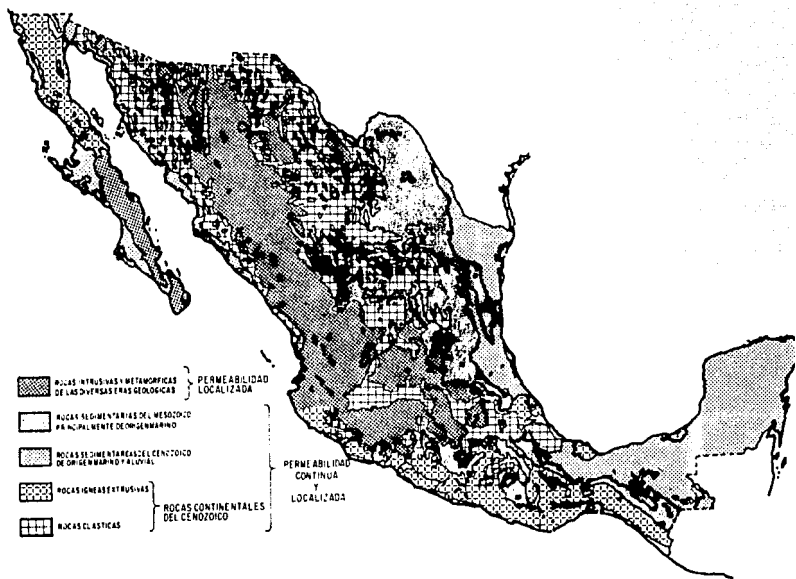


Fig 52.-Geología de la República Mexicana



Fig 53.-Regiones geohidrológicas de la República Mexicana

### V.3.- REGIONALIZACION DE LOS ACUIFEROS

#### 3.1.- Acuíferos en aluviones recientes

Son aluviones de rellenos depositados y acumulados en valles, cuencas, planicies costeras y deltaicas. Sus sedimentos estan constituidos por mantos de gravas, arenas y arcillas, que fueron depositadas por descargas de materiales acarreados por ríos y arroyos en su desembocadura hacia valles y planicies de inundación. Los lugares donde estan siendo explotados son principalmente:

Dépositos deltáicos del Valle de Mexicali, planicie de inundación de la ciudad de Obregon Sonora; La Paz Baja California; Coatzacoalcos Ver. y en el interior del país se explotan acuíferos de este grupo en algunas cuencas cerradas, como son la región lagunera de Coahuila y Durango, en la Cuenca del Valle de México y en los valles centrales de Oaxaca.

#### 3.2.- Acuíferos regionales en calizas

Existen en el país, cubriendo grandes extensiones, afloramientos muy amplios de rocas calizas cretácicas como las formadas en la Sierra Madre Oriental, partes de la Sierra Madre del Sur y Sierra de Chiapas, las cuales estan constituidas principalmente por carbonatos de calcio, originados y depositados bajo el mar, formando grandes espesores hasta de 1 000 mt ,que han emergido a la superficie.

En la losa calcárea Yucateca afloran exclusivamente calizas que son acuíferos de muy alto potencial productor, explotados en Mérida, Ticul y Peto en Yucatán; Cancún, Pueté y Alvaro Obregón en Quintana Roo y Edzná y Champotón en Campeche.

### 3.3.- Acuíferos regionales en cuencas terciarias

Se caracterizan por gruesos espesores de sedimentos lacustres y aluviales dentro de lo que hoy es la meseta central y la región noroeste del país. Debido a la gran actividad volcánica ocurrida en ese tiempo; es común encontrar este tipo de sedimentos intercalados con derrames de rocas ígneas.

Las formaciones terciarias son muy arcillosas, por lo cual no contienen almacenamientos apreciables de agua subterránea debido a su impermeabilidad. En la península de Yucatan las rocas del terciario marino están representados por mantos de calizas que constituyen muy buenos acuíferos (Figura 54).

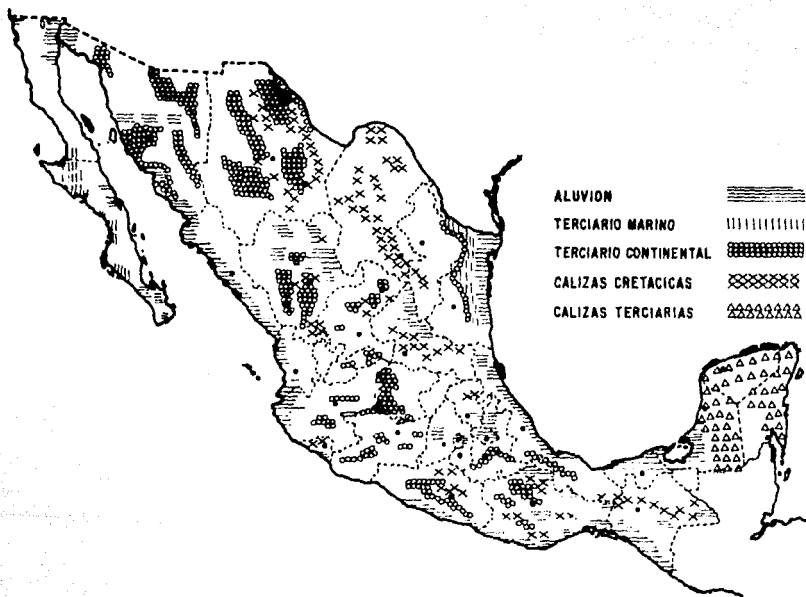


Fig 54.-Mapa de la regionalización de los acuíferos.

#### V.4.- REGIONES GEOHIDROLOGICAS DE MEXICO

Generalmente se acostumbra dividir a México en seis regiones de la siguiente manera:

ZONA NOROESTE	Baja California Norte Baja California Sur Sonora Sinaloa Nayarit
ZONA NORTE	Chihuahua Coahuila Durango Zacatecas Aguas Calientes
ZONA NORESTE	Nuevo León Tamaulipas San Luis Potosí Veracruz
ZONA CENTRO	Jalisco Colima Guanajuato Michoacán Querétaro Puebla Tlaxcala Morelos
CUENCA DE MEXICO	Distrito Federal Estado de México Hidalgo

**ZONA SURESTE**

Oaxaca  
Chiapas  
Tabasco  
Campeche  
Quintana Roo  
Yucatán

A continuación se tratará por separado cada una de las seis zonas. Se presentará, inicialmente, un mapa que muestre la situación dentro del territorio nacional. En seguida se muestra un cuadro de datos para cada uno de los estados que la componen, finalmente, se mencionan las características geológicas, climáticas y geohidrológicas generales de cada estado. Los datos proporcionados se obtuvieron de 1981 y años anteriores.



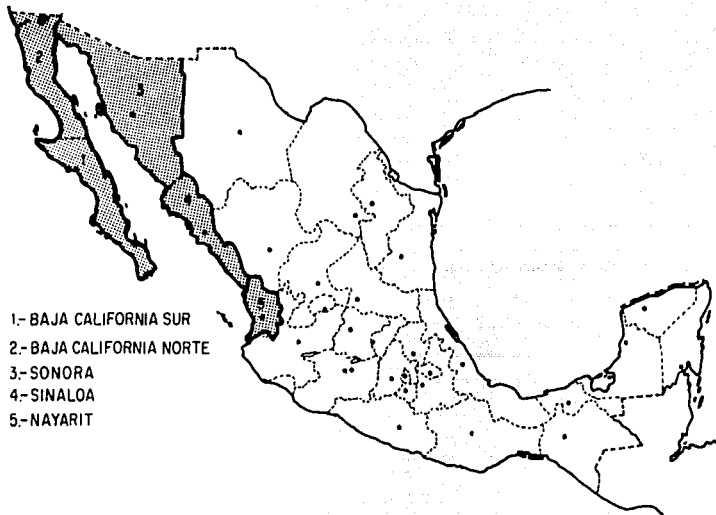


Fig 55.-Región Noroeste.

ESTADO	AREA TOTAL Km2	AREA ESTUD. Km2	AREA EXPLOR Km2	RECARGA ANUAL MM m3	EXTRAC ANUAL MM m3	No. de POZOS
B.CALIFORNIA N	70,113	24,971	8,503	922	1,288	3,476
B.CALIFORNIA S	73,677	26,548	3,666	250	442	1,889
SONORA	184,932	52,831	18,861	913	2,704	4,093
SINALOA	58,092	4,527	3,880	314	556	1,056
NAYARIT	27,621	1,859	646	60	58	678

TABLA 10.-REGION NOROESTE

#### 4.1.- Región Noroeste

##### 4.1.1.- BAJA CALIFORNIA NORTE

Su clima es desértico, seco y caluroso. Sus actividades económicas se basan en la agricultura y la pesca. Su precipitación anual varía de 100 a 200 mm. Los acuíferos existentes se encuentran sobre sedimentos terciarios marinos y fluviales; su potencial acuífero es bajo debido a la escasa precipitación y a la poca extensión y capacidad de almacenamiento de las formaciones acuíferas.

Sus principales Valles son: Valle de Mexicali, Valle de Ensenada, Valle de San Telmo, Valle Ojos Negros, Valle Real del Castillo, Valle de San Quintín.

Los acuíferos de esta región presentan los niveles dinámicos de los pozos bajo el nivel del mar, lo que provoca la intrusión salina que amenaza el desarrollo de esta región, además de presentar el minado gradual de las reservas subterráneas debido a la concentración de sales disueltas en el agua.

##### 4.1.2.- BAJA CALIFORNIA SUR

Su clima es desértico, seco y caluroso y un poco variable. Su economía se basa en la agricultura y en la pesca. Su precipitación anual varía de 100 a 300 mm. Es la entidad del país con el menor potencial hidráulico, ya que está ubicada en la porción más árida; sus recursos superficiales son casi nulos y los subterráneos son escasos, debido a su lenta renovación y a las reducidas dimensiones en el almacenamiento de sus acuíferos. Estos se presentan sobre sedimentos terciarios marinos y continentales.

Sus principales Valles son : Cabo San Lucas, Valle Todo Santos, Valle de Santo Domingo y La Paz.

#### 4.1.3.- SONORA

Su clima es desértico y seco. Su economía se basa en la agricultura y la ganadería. Su precipitación anual es de 100 a 300 mm. La extracción del agua subterránea se efectúa sobre aluviones recientes y sedimentos terciarios continentales.

Sus principales Valles son: Valle de Hermosillo, Sonorita, Puerto Peñasco, Caborca, la costa de Hermosillo, Mesa arenosa de San Luis Río Colorado, Guaymas etc.

#### 4.1.4.- SINALOA

Su clima es estepario de altura, extremo y tropical. La agricultura es la base de la economía. Su precipitación anual es de 1 000 mm. Su gran densidad hidrográfica y las grandes extensiones irrigadas por medio de presas favorecen la perforación de pozos a lo largo de los márgenes de los ríos, aprovechando la permeabilidad de los acarreo y sus recargas.

Sus principales Valles son :Valle de los Mochis, margen izquierdo del río Sinaloa, margen derecho del río Sinaloa, Valle Fuerte-Mayo.

#### 4.1.5.- NAYARIT

Su clima es tropical húmedo y frío en las montañas. Su economía se basa en la agricultura y la pesca. Su precipitación anual es de 1 000 a 1 500 mm. En el interior del estado se explotan acuíferos de buena producción en aluviones recientes y basalto.

Sus principales valles son : Valle de Banderas, Valle Matatipac y Chapalilla entre otros.

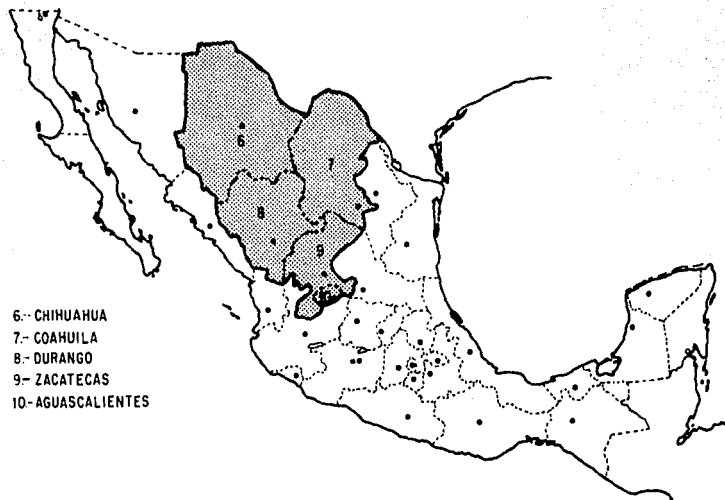


Fig 56.-Región Norte

ESTADO	AREA TOTAL Km2	AREA ESTUD. Km2	AREA EXPLOT Km2	RECARGA ANUAL MM m3	EXTRAC ANUAL MM m3	No. de POZOS
CHIHUAHUA	247,087	58,938	21,126	378	1,549	7,828
COAHUILA	151,571	22,619	14,728	84	818	4,600
DURANGO	119,848	24,778	8,721	178	859	4,289
ZACATECAS	75,040	11,898	6,855	215	288	3,600
AGUASCALIENTES	5,589	3,424	2,620	332	332	2,500

TABLA 11.-REGION NORTE

#### 4.2.- Región Norte

##### 4.2.1.- CHIHUAHUA

Su clima es desértico. Su economía se basa en la ganadería, minería y la industria. Su precipitación anual es de 200 a 300 mm. Presenta posibilidades geohidrológicas en los valles rellenos por espesores piroclásticos y sedimentos conglomeráticos y arenosos terciarios y recientes. El potencial subterráneo es limitado, ya que su renovación es lenta a causa del clima semidesértico.

Sus principales Valles son : Valle de Juárez, Valle Jiménez Camargo, Valle Casas Grandes-Janos y el Valle de Cd. Cuahutémoc.

##### 4.2.2.- COAHUILA

Predominan climas secos y muy secos, por lo que los recursos hidráulicos son muy escasos. Las precipitaciones medias anuales son en muchas zonas menores de 250 mm y los escurrimientos superficiales muy limitados; sin embargo, la entidad cuenta con abundantes afloramientos de calizas potencialmente formadoras de acuíferos, como es el caso de los valles de Saltillo, Monclova, Ocampo y Palestina.

El aumento de los volúmenes de extracción y la reducción de las recargas a consecuencia de la construcción de presas, han generado una de las zonas sobreexplotadas más evidentes. Los niveles de agua han descendido hasta 100 m.



#### 4.2.3.- DURANGO

Su clima es desértico, el agua superficial es escasa y se presenta en forma transitoria. Cuenta con un potencial agrícola, ganadero y forestal aprovechado solamente en parte, debido a la carencia de recursos hidráulicos.

Las zonas con mayores posibilidades de producción acuífera se localizan en los valles de la porción central sobre sedimentos terciarios, donde se destaca el Valle de Guadiana por su desarrollo agrícola e industrial. Otros valles relativamente importantes son Canatlán, Santiaguillo, Poanas, Fco. I. Madero, Vicente Guerrero y Suchil. Hacia la porción noreste se localiza una parte de la Región Lagunera. La exploración en calizas apenas se ha iniciado con resultados alentadores en el área de San Luis del Cordero.

#### 4.2.4.- ZACATECAS

Predomina el clima desértico. Las porciones centro y sur del estado son las que presentan mejores posibilidades geohidrológicas. En éstas se localizan valles como: Fresnillo, Calera, Chupaderos, Ojo Caliente, Villa de Cos e Hidalgo. En la porción norte, en cambio, donde se encuentran valles como Cedros, Avalos y Grudiñero, la concentración salina es tan grande que el agua podría utilizarse para producir sales.

Los principales acuíferos del estado son de tipo libre y se encuentran en materiales de relleno y rocas de la entidad. La recarga natural proviene de las sierras que colindan con los grandes valles.

#### 4.2.5.- AGUASCALIENTES

En términos generales, gran parte del estado se encuentra bajo control de veda, debido a la gran sobreexplotación de los acuíferos, que existe por el sobreuso del agua. Además la poca precipitación pluvial y la elevada evaporación dificultan la recarga de los acuíferos de la zona.

Todo el estado está comprendido en la zona Lerma-Chapala-Santiago, comprendiendo los valles de Aguascalientes, Chicalote, Calvillo, El Llano y Palo Alto. Los materiales en estos valles están representados por rellenos recientes de gravas, arenas y arcillas con espesores hasta de 300 m formando acuíferos libres.

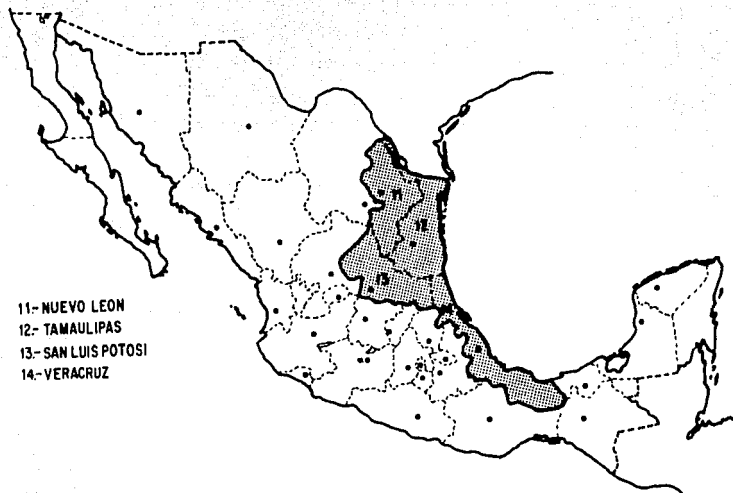


Fig 57.-Región Noreste

ESTADO	AREA TOTAL Km2	AREA ESTUD. Km2	AREA EXPLOR Km2	RECARGA ANUAL MM m3	EXTRAC ANUAL MM m3	No. de POZOS
NUEVO LEON	64,555	10,213	7,188	—	491	11,500
TAMAULIPAS	79,829	7,825	7,700	269	78	10,000
S.LUIS POTOSI	62,848	18,902	13,600	81	182	1,627
VERACRUZ	72,815	15,515	13,938	600	371	1,181

TABLA 12.-REGION NORESTE

#### 4.3.- Región Noreste

##### 4.3.1.- NUEVO LEON

Su clima es seco con lluvias escasas y predominantes en verano. La precipitación anual es de 300 a 1 000 mm. Su economía se basa en la ganadería, en la agricultura y en la minería. En la región hidrológica de Monterrey se efectúa la explotación de agua subterránea más importante; los campos Mina, Monterrey, Buenos Aires y Topo Chico, son los que aportan mayor caudal.

En esta región se han perforado pozos de 2 000 mt de profundidad y el agua que se obtiene es de buena calidad. En la parte sur del estado, a pesar de su aridez y de la mala calidad de los suelos en el área de Potosí, sus aluviones producen buenos gastos. En la parte del municipio de Doctor Arroyo se han localizado buenos acuíferos en rocas calizas.

##### 4.3.2.- TAMAULIPAS

Su clima es caluroso, la precipitación anual es de 500 a 1 000 mm. Su economía se basa en la ganadería, pesca y minería. Hay escasas explotaciones subterráneas localizadas en un área muy reducida de los márgenes del río Bravo, entre Reynosa y Matamoros. Además de ser escasos los aprovechamientos subterráneos, tienen muy bajos gastos, por lo que no se utilizan en la agricultura, sino para usos domésticos.

La zona sur está constituida casi en su totalidad por depósitos calcáreos del cretácico superior, que ofrecen las áreas con mayor posibilidad de explotación. La presencia de manantiales con caudal abundante constituye una evidencia del acuífero de buen potencial.

#### 4.3.3.-SAN LUIS POTOSI

Su clima es seco estepario al norte y en su parte central y sur templado con lluvias en verano. La precipitación media anual es de 300 a 500 mm. La porción sureste del estado se caracteriza por la abundancia de agua superficial, ya que se encuentra enclavada en la Huasteca.

Los valles más importantes son el de San Luis Potosí y el Valle de Arista. En la zona sur existen acuíferos con baja potencialidad y otros con aguas de mala calidad. Los depósitos de tipo cálcareo encierran manantiales caudalosos, como el de la Media Luna en río Verde que aporta un gasto de  $6 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

#### 4.3.4.- VERACRUZ

Su clima es caluroso, la precipitación anual varía de 1 000 a 2 000 mm. La base principal de su economía es la agricultura, la ganadería, la pesca y la industria petrolera. Gran parte del estado está ocupado por la planicie costera del Golfo de México, constituida por formaciones del terciario marino con arcillas y arenas. La zona con mejores posibilidades de explotación acuífera está comprendida entre los ríos Actopan y Papaloapan y al sur en las partes bajas de las cuencas de los ríos Coatzacoalcos, Uspanapa y Tonalá.

La gran cuenca oriental, parcialmente enclavada, dispone de recursos abundantes, contemplándose la posibilidad de explotarlos para abastecer a la Ciudad de México. Los puertos de Veracruz y Coatzacoalcos presentan intrusión salina.

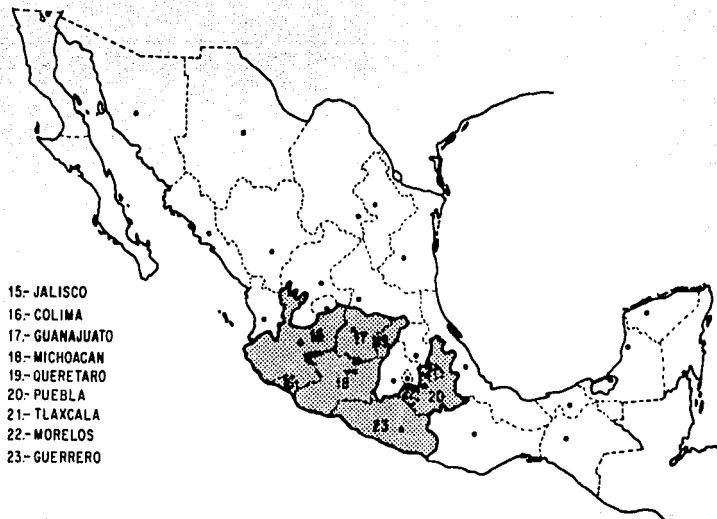


Fig 58.- Región Centro

ESTADO	AREA TOTAL Km2	AREA ESTUD. Km2	AREA EXPLOR Km2	RECARGA ANUAL MM m3	EXTRAC ANUAL MM m3	No. de POZOS
JALISCO	80,137	14,400	12,925	—	281	4,334
COLIMA	5,455	4,561	1,069	244	115	950
GUANAJUATO	30,589	13,721	13,167	450	1,027	5,416
MICHOACAN	59,864	10,107	9,642	—	136	756
QUERETARO	11,769	2,204	1,379	—	1,150	1,057
PUEBLA	33,919	11,949	6,590	474	261	2,500
TLAXCALA	3,941	3,167	2,600	310	51	600
MORELOS	4,941	2,820	1,692	—	646	650
GUERRERO	63,794	19,162	3,968	—	33	203

TABLA 13.-REGION CENTRO



#### 4.4.- Región Centro

##### 4.4.1.- JALISCO

Su clima varía de tropical y subtropical a frío, según la región. La agricultura y la ganadería son las principales actividades económicas. Los acuíferos se encuentran en piroclásticos basálticos y sedimentos terciarios; la porción central está afectada por el gran vulcanismo del eje neovolcánico. Predominan rocas de tipo andesítico y basáltico intercaladas con sedimentos continentales.

Las principales áreas de explotación son : Valle de Ameca-Tula, zona metropolitana de Guadalajara y en la ciénega de Chapala; al sur se explotan acuíferos con fines de riego en Sayula y Ciudad Guzmán. En la costa no se tienen condiciones favorables para la explotación del agua subterránea, ya que en su mayoría son acantilados formados por rocas ígneas impermeables.

##### 4.4.2.- COLIMA

Su clima es tropical, la precipitación anual es de 1 000 mm. Su economía se basa en la agricultura y ganadería. La principal producción de agua subterránea se obtiene a lo largo de la costa, donde los ríos Armería, Salado, Coahuayana, Cihuatlán y otros de menor caudal, han acumulado sedimentos permeables que reciben buenas recargas debido a la precipitación abundante y a sus propios escurrimientos.

En la región hidrológica Armería-Coahuayana se localiza el Valle de Colima, que presenta acuíferos libres y confinados principalmente. También en esta región se encuentra el Valle de Tecmán, ubicado en la planicie costera y que presenta el riesgo de una intrusión salina.

#### 4.4.3.- GUANAJUATO

Su clima es subtropical de altura, variante de acuerdo con la topografía del terreno. La precipitación anual es de 300 a 500 mm. Su economía se basa en la manufactura del calzado, curtiduría de pieles y de las industrias textiles, de conservas y vitivinícola.

El territorio de Guanajuato se encuentra en la región del Bajío, sobre rellenos terciarios sedimentarios con buenas condiciones geohidrológicas, explotándose acuíferos de gran espesor que reciben recarga de los ríos Lerma, Laja y Turbio.

Las aguas subterráneas satisfacen la mayor parte de la demanda de agua potable de numerosas ciudades como Salamanca, Celaya, León e Irapuato, lo cual ha dado lugar a la sobreexplotación de los acuíferos, agravándose este problema en Celaya con la presencia del agrietamiento del terreno.

#### 4.4.4.- MICHOACAN

Su clima es tropical y subtropical de altura. Su precipitación anual varía de 1 000 a 1 500 mm. Su economía se basa en la agricultura, ganadería y avicultura. Las mejores condiciones geohidrológicas se encuentran al norte del estado, donde están los Valles de: Maravatio, Morelia, Queréndaro, Zamora y Zacapu. A lo largo del río Lerma, en los límites con Guanajuato y Jalisco, en los valles de Pastor Ortiz y la Piedad Cabadas, se encuentran acuíferos con buena productividad.

Al sur parecen existir posibilidades acuíferas en calizas. El resto del estado tiene condiciones desfavorables debido a la existencia de materiales con baja permeabilidad y a la altura, con lo que el nivel del agua se encuentra muy profundo.

#### 4.4.5.- QUERETARO

Su clima es templado con lluvias en verano. La precipitación media anual es de 300 a 1 000 mm. Su economía se basa en la agricultura y ganadería. Las principales áreas de explotación acuífera se localizan en los valles de San Juan del Río, Querétaro y Tequisquiapan, donde se explotan acuíferos de espesor variable en materiales sedimentarios de relleno.

La alimentación de los acuíferos es reducida por su clima desértico y semidesértico en algunos lugares, y los niveles de agua se encuentran generalmente profundos debido a la topografía montañosa. Sus porciones sur y occidental presentan mejores condiciones por su mayor precipitación pluvial y su topografía relativamente plana. Actualmente, el acuífero localizado en la capital del estado se encuentra en condiciones de severa sobreexplotación.

#### 4.4.6.- PUEBLA

Su clima es variable y va desde frío hasta templado y cálido. La precipitación anual es de 300 a 400 mm. Su economía se basa en la agricultura y sus aguas mineralizadas, que se aprovechan para la industria.

Las zonas de mayor explotación de agua subterránea son : Valle de Puebla, Valle de Atlixco, Distrito de Riego de Valsequillo y Valle de Palmar Bravo. Su condición geohidrológica en general corresponde a una zona subexplotada.

#### 4.4.7.- TLAXCALA

Su clima es subtropical de altura, con las variantes seco en los llanos de Huamantla y Pie Grande, frío en las alturas y un tanto húmedo en el Valle de Apizaco. La precipitación anual es de 200 mm. Su economía se basa en la agricultura y en la ganadería.

En el Valle de Tlaxcala existe un manto acuífero, el cual recibe su recarga de los ríos Atoyac y Zahuapan. En el Valle de Soltepec, los niveles son profundos, abajo de 80 mts, y la producción es aceptable.

En el área de Apizaco existen acuíferos de buena producción pero con niveles profundos. Los principales aprovechamientos de agua subterránea se efectúan en el Valle de Huamantla y en la zona de Zacatelco, donde se le destinan a la agricultura.

#### 4.4.8.- MORELOS

Su clima en lo general es cálido y en pocas partes templado. La precipitación anual es de 1 500 mm. Su economía se basa en la agricultura, ganadería y minería. Por medio de pozos se obtiene buena producción en los valles de Cuernavaca, Emiliano Zapata y Temixco. En Tepoztlán se obtiene también agua por medio de pozos y norias.

En el área de Puente de Ixtla se producen gastos de 80 a 100 lt/seg. En la misma zona y en el poblado de San Gabriel de las Palmas existe un pozo artesiano con un gasto de más de 500 lt/seg. El Valle más importante es el de Cuernavaca, cuyo desarrollo turístico e industrial está sustentado por el recurso subterráneo, donde los acuíferos se localizan en basaltos, piroclastos y tobas.

#### 4.4.9.- GUERRERO

Su clima es tropical y subtropical de altura. Su precipitación anual es de 1 000 a 1 500 mm. Su economía se basa en la agricultura y el turismo.

Las condiciones geohidrológicas son desfavorables, debido a la fisiografía montañosa y al predominio de rocas impermeables. La zona que tiene mejores condiciones es la de la Costa Chica, además de que cuenta con abundantes aguas superficiales.

Generalmente los acuíferos son de pequeños espesores; no obstante esto, satisfacen gran parte de las demandas para usos municipales y domésticos. Sus principales áreas son : Chilpancingo en calizas, Cuajinicuilapa, Acapulco e Ixtapa Zihuatanejo en aluviones.

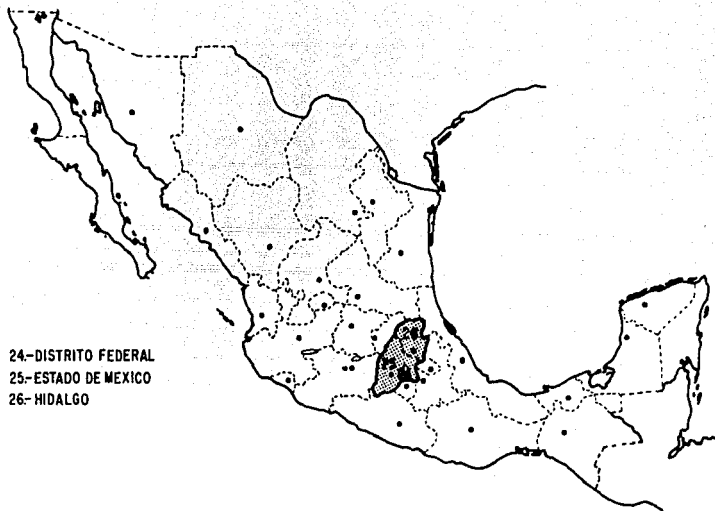


Fig 59.-Cuenca de México

ESTADO	AREA TOTAL Km2	AREA ESTUD. Km2	AREA EXPLOT Km2	RECARGA ANUAL MM m3	EXTRAC ANUAL MM m3	No. de POZOS
--------	----------------------	-----------------------	-----------------------	---------------------------	--------------------------	-----------------

DISTRITO FEDERAL	1,499	1,499	—	620	1,085	26,820
ESTADO DE MEXICO	21,461	4,400	2,085	341	537	22,300
HIDALGO	20,987	10,314	4,314	243	43	3,923

TABLA 14.-CUENCA DE MEXICO

#### 4.5.- Cuenca de México

##### 4.5.1.- DISTRITO FEDERAL

Su clima es templado con lluvias en verano, la precipitación anual es de 1 000 a 2 000 mm. Su actividad económica se basa en el comercio ya sea como propietarios o como empleados; una gran parte se emplean en las diferentes dependencias gubernamentales e industriales.

La explotación intensiva de los acuíferos ha ocasionado la compactación de las arcillas, lo que ha provocado el hundimiento de la ciudad. A través de los estudios realizados se sabe que de la planicie de Xochimilco el flujo se dirige hacia la Ciudad de México y en la planicie de Chalco se forma un cono de abatimiento local.

##### 4.5.2.- ESTADO DE MEXICO

Su clima es templado con lluvias en verano en el norte y caluroso (tropical húmedo con lluvias en verano) en el sur. La precipitación anual es de 500 a 1000 mm; en algunas regiones llega a alcanzar los 2 000 mm. Su economía se basa en sus diferentes industrias, la agricultura y la ganadería.

El estado cuenta con dos áreas de gran producción acuífera: al poniente el Valle de Toluca-Ixtlahuaca, conocido también como Alto Lerma, y al oriente, las zonas de Cuautitlán, Teotihuacán, Texcoco y Chalco que forman parte de la cuenca del Valle México. Dichos acuíferos suministran el agua potable a la Ciudad de México y así mismo para usos domésticos y agrícolas, que requieren los numerosos núcleos dispersos en la entidad.



El abastecimiento de las zonas industriales se satisface mediante pozos profundos, presentaefectos nocivos, como el descenso progresivo de los niveles y el agrietamiento del terreno causado por la alta concentración de bombeo.

#### 4.5.3.- HIDALGO

Su clima es templado con lluvias en verano. La precipitación anual es de 500 a 1 000 mm. La economía se basa en la agricultura, la minería y la ganadería. Las principales areas de explotación acuífera se encuentran al sur del estado en un arco que forman los municipios de Tepejí del Río, Ixmiquilpan, Tulancingo, Tezonautla, Pachuca, Tizayuca, Apan y el Valle del Mezquital.

La principal fuente de agua se encuentra en los acuíferos del Valle del Mezquital, cuya recarga se incrementa notablemente al iniciarse el riego con aguas superficiales(negras). Como la explotación del acuífero es mínima, la mayor parte de la descarga se realiza a través del Río Tula y de numerosos manantiales.

Existe la posibilidad de contaminación de los acuíferos con detergentes y compuestos nitrogenados.

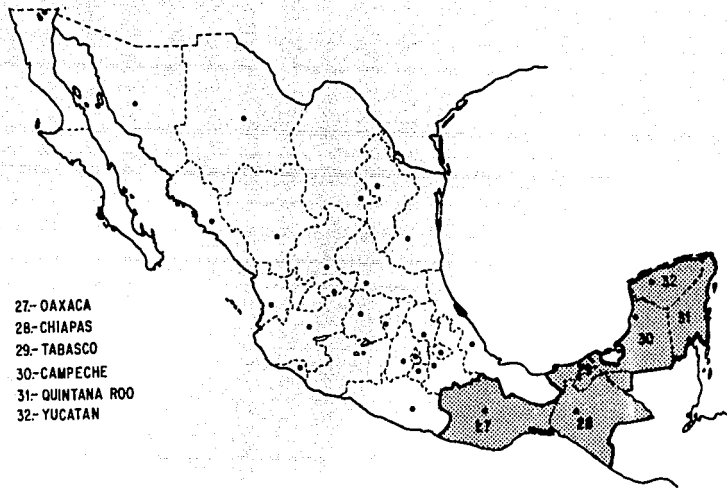


Fig 60.— Región Sureste

ESTADO	AREA TOTAL Km2	AREA ESTUD. Km2	AREA EXPLOR Km2	RECARGA ANUAL MM m3	EXTRAC ANUAL MM m3	No. de POZOS
OAXACA	33,919	5,375	1,835	—	58	2,117
CHIAPAS	73,877	13,100	8,257	—	149	2,132
TABASCO	24,661	7,605	7,400	—	35	500
CAMPECHE	56,114	6,320	2,295	—	60	79
QUINTANA ROO	42,030	8,770	3,058	—	150	256
YUCATAN	35,500	32,500	5,000	—	300	5,000

TABLA 15.-REGION SURESTE

#### 4.6.- Región Sureste

##### 4.6.1.- OAXACA

Su clima en la costa es caluroso, la precipitación anual es de 500 a 1 000 mm. La base de su economía es la agricultura, la ganadería y la minería. En la región Mixteca, Ca;ada Oaxaqueña y en la zona del Itsmo de Tehuantepec; cerca de los límites con el estado de Veracruz, se presentan afloramientos importantes de calizas cretácicas que tienen buen potencial acuífero. En una gran extensión de la Mixteca, las calizas están cubiertas por sedimentos terciarios arcillosos.

Las regiones geohidrológicas más relevantes son: La Mixteca, Atoyac, Zona Chonta, Valle Etla etc.

##### 4.6.2.- CHIAPAS

Su clima es tropical húmedo con lluvias todo el año. La precipitación anual es de 1 000 a más de 2 000 mm. Su economía se basa en la agricultura y la ganadería, aunque no en gran escala.

En esta entidad se tiene una zona de libre alumbramiento de agua subterránea, correspondiente a la superficie que se encuentra fuera de la cuenca del río Grijalva, que cubre aproximadamente el 50 % de la superficie del estado. Sus regiones geohidrológicas más importantes son: Amago-Tonalá, Comitán-Montebello, Soconusco y Zona Costera.

#### 4.6.3.- TABASCO

Su clima es caluroso (tropical húmedo con lluvias todo el año). Su precipitación anual es de más de 2 000 mm y su economía se basa en la agricultura, ganadería, pesca y la industria petrolera.

La precipitación pluvial alta y los ríos tan caudalosos como el Grijalva y el Usumacinta dan lugar a que se formen extensas zonas pantanosas y manglares.

Las condiciones geohidrológicas son en general favorables para la explotación del agua del subsuelo, siendo su principal fin el abastecimiento para el consumo doméstico de centros de población, ya que para usos agrícolas es preferible el uso de aguas superficiales controladas. Una de las áreas donde se está desarrollando actualmente un plan de drenaje y riego en aguas del subsuelo es en la Chontalpa.

#### 4.6.4.- CAMPECHE

Su clima es caluroso, la precipitación media anual es de 1 000 a 2 000 mm. Su economía se basa en la agricultura, la pesca y la industria petrolera. Esta región se encuentra en condiciones geohidrológicas de subexplotación, por lo que carece de estudios actualizados. Se perforan pozos para el abastecimiento de agua potable de pequeñas localidades.

Sus regiones geohidrológicas son : Edzna-Bonfil, Francisco Escórcega, Nuevo Zinaporo y Champotón.

#### 4.6.5.- QUINTANA ROO

Su clima es tropical de monzón con lluvias en verano producidas por los vientos monzones. Su precipitación anual es de 1 000 a 2 000 mm. Su economía se basa en la explotación de maderas finas y de chicle, así como en la agricultura y la pesca.

Los acuíferos generalmente se localizan a profundidades muy someras, entre seis y treinta metros. Sus regiones geohidrológicas más importantes son: Cancún, Isla Mujeres, Cozumel, Alvaro Obregón, etc.

#### 4.6.6.- YUCATAN

Su clima es tropical húmedo con lluvias en verano. La precipitación anual varía de 1 000 a 2 000 mm. Su economía se basa en la agricultura, la industria maderera, la pesca y el turismo.

El tipo de roca y el sistema hidrológico ha dado lugar a una topografía kárstica caracterizada por la presencia de sumideros conocidos en el área como cenotes, llenos de agua en torno a los cuales se han asentado los pueblos, siendo frecuentes los estanques, las grutas y presentando un drenaje subterráneo.

#### 4.7.- Resumen del Capitulo V

La región noroeste es la de menos precipitación, ha excepción de Sinaloa y Nayarit. También es la zona que tiene menos recarga y más peligro de intrusión salina.

La región Norte es la zona árida del país, con menos escurrimiento superficial y mayores problemas de contaminación acuífera por la construcción ígnea de sus formaciones.

La Noreste cuenta con menos acuíferos granulares por la presencia de formaciones calcáreas de gran capacidad.

La región Centro es la más poblada y tiene problemas de sobreexplotación y contaminación causada por el hombre.

La Cuenca del Valle de México, por su parte al ocupar la parte central de la República, no es la excepción en cuanto a los problemas de sobreexplotación y contaminación antropogénicas, sin embargo es la región más estudiada.

Finalmente la región Sureste no debe tener problemas de sobreexplotación, aunque corre el peligro de presentarse intrusión salina y contaminación.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- R. Allan Freeze, John A. Cherry  
"Ground Water"  
Ed. by Prentice - Hall International , Inc London 1979.
- 2.- Ings: Javier Andrade Vargas y Guillermo Correu Toledo  
"Manual para el alumbramiento de Aguas Subterráneas"  
Ed. Programa de Perforaciones con Recursos del FIRA -  
(Fondo de Garantía y Fomento para la Agricultura, Ganadería y Avicultura) 1974.
- 3.- Banco Nacional de Información Geohidrológica (Volumen I)  
"Atlas Geohidrológico"  
Ed. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1978.
- 4.- Custodio, Emilio y Llamas, Manuel Ramón  
"Hidrología Subterránea (volumen I y II)"  
Ed. Omega, S.A Barcelona 1976.
- 5.- Castany. G  
"Prospección y Explotación de Aguas Subterráneas"  
Ed. Omega, Barcelona 1975.
- 6.- Castany. G  
"Tratado Práctico de las Aguas Subterráneas"  
Ed. Omega, Barcelona 1971.
- 7.- Davis y De Wiest  
"Hidrogeología"  
Ed. Ariel, 1976.



- 8.- Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos  
"Sinopsis Geohidrológica por Estado"  
Ed. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.  
Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, 1987.
- 9.- División de Educación Continua  
"Exploración Cuantificación y Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos Subterráneos"  
Ed. Facultad de Ingeniería, UNAM 1985.
- 10.- División de Educación Continua  
"Hidrología Aplicada a la Ingeniería"  
Ed. Facultad de Ingeniería, UNAM 1985.
- 11.- Herbert F. Wang, Mary P. Anderson  
"Introduction to Groundwater Modeling Finite Difference and Finite Element Methods"  
Ed. W. H Freeman and Company, San Francisco 1982.
- 12.- Eulalio Juarez Badillo - Alfonso Rico Rodríguez  
"Teoría y Aplicaciones de Mecánica de Suelos"  
Ed. Limusa, México 1981.
- 13.- Notas de Clase: Geohidrología II  
Maestro: M.C Rubén Martínez Guerra.
- 14.- Sociedad Mexicana de Mecánica del Suelo A.C.  
Asociación Geohidrológica Mexicana A.C.  
"Revista de la Mecánica de Suelos y la Geohidrología"  
Ed. Palacio de Minería, México D.F 1985.

15.- Jaime A. Tinajero González

"Aspectos Fundamentales en el Estudio del Agua Subterránea"  
(Geohidrología)

Ed. Departamento de Ingeniería Hidráulica, UNAM 1985.