



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

Facultad de Ingeniería

**“ PERFORACION DE POZOS PARA  
LA RECARGA DE ACUIFEROS ”**

**TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A:  
RICARDO LEMUS FABILA**

México, D. F., Noviembre, 1993

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## I N D I C E

CAPITULO I INTRODUCCION

CAPITULO II AGUA SUBTERRANEA 1

CAPITULO III DEFINICIONES Y CONCEPTOS 3  
GENERALES

- III.1 Acuífero
- III.2 Acuífugo
- III.3 Acuícludo
- III.4 Acuífardo
- III.5 Porosidad
- III.6 Rendimiento Específico
- III.7 Retención Específica
- III.8 Porosidad Específica
- III.9 Coeficiente de Permeabilidad o Conductividad Hidráulica
- III.10 Permeabilidad Intrínseca
- III.11 Homogeneidad
- III.12 Isotropía
- III.13 Acuífero Libres y Acuíferos Combinados
- III.14 Almacenamiento Específico
- III.15 Trasmisibilidad y Almacenamiento
- III.15A Coeficiente de Trasmisibilidad, T
- III.15B Coeficiente de Almacenamiento, S

- III.16 Hidroestratigrafía
- III.16A Medios Continentales
- III.16B Depósitos de Planicie de Inundación
- III.16C Medios Desérticos
- III.17 El Subsuelo como un Modelo Hidrogeológico
- III.17A Mapas de Nivel Freático
- III.18 Plegamientos :  
Anticlinales y Sinclinales
- III.19 Fallas
- III.20 Manantiales

CAPITULO IV BALANCE DE AGUA SUBTERRANEA 36

- IV.1 Ecuación de Balance
- IV.2 Piezometría
- IV.3 Hidrógrafos de Pozos
- IV.4 Planos de Profundidad al Nivel del Agua
- IV.5 Configuraciones Piezométricas

CAPITULO V HIDRAULICA DE POZOS 45

- V.1 Ecuación de Movimiento
- V.2 Flujo Establecido
- V.3 Flujo Transitorio
- V.4 Pruebas de Bombeo

- V.5 Pruebas de Bombeo con Régimen Establecido
- V.6 Pruebas de Bombeo con Régimen Transitorio
- V.7 Fórmula Modificada para Pruebas de Bombeo con Régimen Transitorio
- V.8 Acuíferos Semiconfinados con Flujo Vertical
  - V.8.1 Método de la Curva Tipo para Flujo no Establecido
  - V.8.2 Método Gráfico de Hantush para Acuíferos Semiconfinados
  - V.8A Hidrogeoquímica
  - V.8B Principales Procesos Hidrogeoquímicos
  - V.8C Muestreo
  - V.8D Formas de Expresión de los Análisis Químicos

CAPITULO VI METODOS DE PERFORACION

76

- VI.1 Método de Percusión o Pulseta
- VI.2 Método Rotatorio
- VI.2A Perforaciones por el Sistema Rotatorio
  - VI.2B Sistema de Circulación de Lodos
  - VI.2C Ejecución de Perforaciones por el Sistema de Percusión
- VI.3 Ademe
  - VI.3A Ademe Ciego
  - VI.3B Ademe Ranurado

- VI.4 Cementación del Pozo
- VI.5 Selección del Equipo
- VI.6 Análisis del Equipo  
Complementario
- VI.6A Aspecto Económico
- VI.7 Estimulación de Pozos

CAPITULO VII RECARGA ARTIFICIAL

107

- VII.1 Métodos de Recarga
- VII.2 Recarga del Acuífero por  
Realimentación
- VII.3 Recarga del Acuífero mediante el  
Proceso de Tratamiento del  
Efluente por Infiltración-  
Percolación
- VII.3A Posibles Sitios de Recarga en el  
Distrito Federal
- VII.3B Sitios de Recarga fuera de los  
límites del Distrito Federal
- VII.4 Características del Sitio  
Seleccionado
- VII.5 Descripción General del Sitio  
Seleccionado

CAPITULO VIII CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

## I N T R O D U C C I O N

El suministro de agua potable para la ciudad de México ha sido una lucha constante en la cual se han aprovechado las fuentes de abastecimiento disponibles y la construcción de una infraestructura para su captación, conducción y distribución, que se caracteriza por su magnitud y complejidad desde el punto de vista operativo.

Actualmente, la capital de la República cuenta con una población de 8.5 millones de habitantes, a los que se abastece 35 mil litros por segundo de agua potable; de éstos el 78 por ciento proviene de fuentes subterráneas, extraídos por medio de 847 pozos: 64 por ciento del acuífero del Valle de México y 14 por ciento del acuífero del Valle del Lerma; el caudal restante es tomado de fuentes superficiales: 2 por ciento de manantiales ubicados en las regiones Poniente y Sur de la ciudad, y 20 por ciento del Sistema Cutzamala.

A fines del siglo pasado, y debido al crecimiento de la población, se recurrió a la perforación de pozos para extraer el agua del acuífero del Valle de México, con el fin de reforzar el suministro. Sin embargo, conforme pasó el tiempo, estos recursos resultaron insuficientes, por lo que se requirió de fuentes externas al Valle de México: primero, en la década de los años cincuenta, al acuífero del Valle de Lerma, ubicado a 60 kilómetros de la ciudad, y recientemente a la cuenca del Río Cutzamala donde el agua tiene que conducirse una distancia de 130 kilómetros y vencer un desnivel de 1200 metros.

El acuífero de la Ciudad de México es del tipo semiconfinado, constituido, en general, por depósitos aluviales de gravas, confinados por capas de arcilla altamente compresible de origen lacustre, intercalados en algunos casos con estratos de roca de origen basáltico.

Por lo que es de gran importancia hacer un estudio detallado para la perforación de pozos tanto de extracción como de inyección.



## C A P I T U L O    I I

### A G U A    S U B T E R R A N E A

Geohidrología o hidrología subterránea es la rama de la hidrología que trata del agua subterránea su yacimiento y movimiento, su recarga y descargas; de las propiedades de las rocas que influyen en su ocurrencia y almacenamiento, así como de los métodos empleados para la investigación, utilización y conservación de la misma.

Conviene separar el agua del subsuelo en dos zonas, por tener diferente comportamiento: estas zonas son la de aereación y la saturada. La primera va desde el nivel de la superficie del terreno hasta la superficie freática, que es aquella donde las partículas de agua tienen presión atmosférica. En la zona de aereación actúan fuerzas capilares que disminuyen la presión del agua. La zona saturada está bajo el nivel freático con presiones mayores que la atmosférica. Esta zona es la de mayor interés en geohidrología.

El agua subterránea constituye una importante fuente de abastecimiento y en algunas áreas es el recurso único para satisfacer las demandas. El agua subterránea mantiene una interrelación con el agua superficial; la intercepción del escurrimiento superficial mediante obras artificiales puede disminuir o cambiar la recarga de los acuíferos.

En la parte central del país, los acuíferos se encuentran ubicados predominantemente en las cuencas terciarias (sedimentos lacustres, conglomerados intercalados con rocas ígneas extrusivas).

En el Valle de México, la sobreexplotación de los acuíferos ha ocasionado el hundimiento del centro de la Ciudad de México, generando grietas que pueden afectar la infraestructura subterránea (tuberías, alcantarillado, etc.), así como edificaciones.

El rápido crecimiento de la población en el Distrito Federal implica un aumento en el consumo de agua y dadas las condiciones en las que se encuentra el Valle de México, se tendrá la necesidad de manejar recursos tales como el reuso de aguas tratadas, o seguir importando agua de las cuencas más lejanas, como el Amacuzac y Oriental.

El uso del agua subterránea en México ha tenido un desarrollo acelerado en los últimos años, tanto por el crecimiento explosivo de la demanda, como porque cumple casi siempre con las normas de calidad para cualquier uso, como porque el avance en la técnica de perforación de pozos profundos ha facilitado su explotación.

## C A P I T U L O    I I I

### DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES

#### III.1 A C U I F E R O

Es una zona subterránea natural que almacena y trasmite agua de buena calidad, que puede extraerse en cantidad económicamente aprovechable.

Esto es, se considera acuífero a una arenisca que da unos cuantos litros por segundo en una región desértica y se considera roca impermeable a la misma formación si está en un valle aluvial de gravas y arenas.

Se pueden mencionar varios ejemplos de acuíferos como: aluviones de material grueso, areniscas poco cementadas, rocas volcánicas, calizas cavernosas, etc.

#### III.2 A C U I F U G O

Es una zona subterránea natural que no almacena ni trasmite agua. Como ejemplo de un acuífugo se pueden mencionar a las rocas volcánicas y metamórficas compactas y no intemperizadas o fracturadas.

#### III.3 A C U I C L U D O

Es una zona subterránea natural que almacena agua pero que no la trasmite en cantidades significativas en un balance regional de aguas subterráneas.

En este caso podríamos mencionar como ejemplo a una lutita cementada en contacto con un acuífero muy permeable (caliza cavernosa).

#### III.4 A C U I T A R D O

Es una zona subterránea que almacena agua y la trasmite en cantidades que afectan un balance regional de agua subterránea pero que no se puede aprovechar directamente mediante pozos.

Una formación de este tipo es el del Valle de México, una arcilla en contacto con un acuífero de arena.

#### III.5 P O R O S I D A D ( n )

Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de un material

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (1)$$

donde  $V_v$  volumen de vacíos, en  $m^3$   
 $V_t$  volumen total, en  $m^3$

En la zona de saturación los vacíos están llenos de agua por lo que la porosidad da una medida de la cantidad de agua almacenada en el material.

La porosidad mide la cantidad de agua que almacena un material y no su movilidad. La estructura interna de los sólidos define la conectividad entre los poros (estructura interna de los poros) de tal manera que un material puede tener muy alta porosidad, contener mucha agua pero no permitir su drenado. Ese es el caso de las formaciones llamadas acuicludos y acuitardos como son las arcillas, las lutitas, etc.

La porosidad se mide en laboratorio sobre muestras de material, tomando la diferencia en peso de la muestra saturada y secada en horno a 105° C.

### III.6 RENDIMIENTO ESPECIFICO ( S, )

Es la cantidad de agua que libera un material drenado por gravedad, por unidad de volumen total.

En la mayor parte de los materiales el agua que se drena por gravedad toma tiempo en hacerlo totalmente desde el momento en el que se hace descender la presión. Esto es comprensible pues se trata de un flujo vertical en el material con gradiente unitario que será más lento entre menor sea la permeabilidad vertical promedio. (Ley generalizada de Darcy)

### III.7 RETENCION ESPECIFICA ( n, )

Es la cantidad de agua retenida por un material contra la gravedad por unidad de volumen total; es agua retenida por fuerzas moleculares y capilares.

De lo anterior se cumple que la porosidad total de un material es igual a la suma del rendimiento específico más la retención específica:

$$n = S_y + n_r \quad (2)$$

### III.8 POROSIDAD EFECTIVA ( $n_e$ )

A la velocidad media en la columna  $v = Q/A$  de la ecuación (3) se le denomina velocidad aparente de filtración ya que el área utilizada no es la real de los conductos de filtración sino toda el área ocupada por granos, poros y agua inmóvil.

La velocidad con que se mueve el fluido entre los canales que forman poros interconectados es muy variable, pero para una sección de flujo que incluya muchos canales, se define una velocidad media real de traslación que es:

$$V = \frac{v}{n_e} \quad (3)$$

donde

$n_e$  es la porosidad efectiva del material.

La porosidad efectiva del material granular es prácticamente igual al rendimiento específico, pero para otros materiales como arcillas, rocas fisuradas, tobos, etc., la movilidad del agua depende de otros factores

como la estructura interna (conductividad entre poros), estado de esfuerzos, fuerzas moleculares, etc.

Para fines prácticos se puede considerar la porosidad efectiva como una medida del área de flujo que realmente utiliza el agua al moverse. Si el área total de una sección de flujo es A (incluidos material sólido, agua retenida por fuerzas moleculares y agua de pozos aislados), la fracción de esa área, utilizada por el agua en movimiento, es la porosidad efectiva, o sea, el área de flujo es:

$$A_r = n_e A \quad (4)$$

Si el gasto de filtración es Q, la velocidad real del movimiento es

$$\frac{Q}{A_r} = \frac{Q}{An_e}$$

de donde se obtiene la ecuación (5).

### III.9 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD O CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA ( K )

Henry Darcy descubrió la ley que lleva su nombre en el año de 1856 al realizar experiencias de filtrado con agua sobre columnas de materiales con área normal al flujo A, longitud "l" y con una diferencia de carga de agua entre la entrada y la salida de la columna "h".

Encontró que el gasto se daba siempre como

$$\frac{Q}{A} = K \frac{h}{l} \quad (5)$$

$$\delta \quad Q = AKi$$

donde K fué el mismo para el material y lo llamó coeficiente de permeabilidad; actualmente se le llama también conductividad hidráulica. Sus unidades son de longitud entre tiempo.

En geohidrología la permeabilidad tiene primordial importancia ya que de ella depende la velocidad de circulación del agua subterránea; su conocimiento es esencial para cuantificar los caudales de flujo subterráneo y la velocidad de propagación de un contaminante. El valor de la permeabilidad se puede obtener a través de pruebas de laboratorio y de campo. Para fines geohidrológicos éstos últimos son los que interesan, ya que así se obtienen valores promedio representativos de áreas extensas. Las pruebas de campo son conocidas como pruebas de bombeo y se describirán más adelante.

### III.10 PERMEABILIDAD INTRINSECA (k)

Las experiencias de Darcy fueron hechas sólo con agua a temperatura ambiente. El coeficiente de permeabilidad depende de las características del material sólido (suelo



ó roca) y de las características del fluido; se expresa como:

$$K = k \frac{\gamma}{\mu} \quad (6)$$

donde

k permeabilidad intrínseca que depende exclusivamente del material.

$\gamma$  peso volumétrico del fluido

$\mu$  viscosidad dinámica del fluido

Las unidades de la permeabilidad intrínseca son de longitud al cuadrado y es usual expresarlas en darcies o milidarcies. Un darcy es por definición:

$$1 \text{ darcy} = 0.987 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2$$

lo que da como resultado de sustituir la ecuación 6 en la ecuación 5, y al expresar el gradiente con presiones y despejar k.

$$k = \frac{(\mu \frac{Q}{A})}{(\frac{dp}{dl})}$$

Por lo anterior, el coeficiente de permeabilidad para agua (relación entre su velocidad aparente de filtración y el gradiente que la mueve) dependerá de su temperatura,

que afecta principalmente a la viscosidad y de su contenido de sales, que afecta al peso específico; ésto deberá tomarse en cuenta en acuíferos geotérmicos o en flujo de aguas salinas.

La temperatura del agua influye notablemente sobre su viscosidad y por tanto en el coeficiente de permeabilidad; entre 10°C y 30°C la viscosidad disminuye más del 40% su valor. En acuíferos geotérmicos donde el agua llega a tener más de 200°C la viscosidad disminuye hasta ser diez veces menor que su valor para 20°C.

Sobre la permeabilidad en materiales arcillosos, influyen los sólidos disueltos; la permeabilidad del agua salada puede ser hasta 100 veces mayor que el agua dulce, debido al mayor intercambio iónico de esta última.

La permeabilidad se determina tanto en pruebas de laboratorio como en pruebas de campo.

Para material granular, cuando la velocidad de infiltración es alta, comienza a haber efectos no lineales en el flujo: primero de inercia y, a mayor velocidad, de turbulencia. En esas condiciones no es ya válida la ley de Darcy que es lineal; el límite de su validez se da con el número de Reynolds (relación entre fuerzas inerciales y viscosas) de filtración:

$$R_e = \frac{V D}{\nu} \quad (7)$$

donde

- D diámetro de filtración, se toma igual al  $D_{10}$  de la curva granulométrica del material.
- $\nu$  viscosidad cinemática del fluido igual a  $\frac{\mu}{\rho}$ ,  $\rho$  densidad del fluido.
- $\mu$  viscosidad dinámica del fluido.

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

### III.11 HOMOGENEIDAD

Se dice que un medio es homogéneo cuando sus propiedades no varían de un punto a otro; de lo contrario el medio es heterogéneo.

### III.12 ISOTROPIA

Se dice que un medio es isótropo cuando sus propiedades en un punto no dependen de la dirección en la que se observen; de lo contrario el medio es anisótropo.

El flujo en suelos y/o rocas, está relacionado con una propiedad del medio que puede variar con la dirección ensayada, la permeabilidad; los casos más comunes son las formaciones estratificadas o fracturadas.

En los medios anisótropos la velocidad del flujo en una dirección se hace, en general, función de los gradientes en tres direcciones independientes entre sí; en un sistema de coordenadas ortogonales (x,y,z) ésto se expresa, por ejemplo, para la velocidad en sentido x como:

$$V_x = K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} + K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

donde  $K_{ij}$  es la permeabilidad sobre el eje i para el gradiente según el eje j.

El vector velocidad  $\bar{V} = (V_x, V_y, V_z)$  se expresa entonces:

$$\bar{V} = K \nabla h \quad (8)$$

donde K es el tensor de permeabilidades:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

que es simétrico, o sea  $K_{ij} = K_{ji}$ ; i y j = x, y ó z. Si se gira el sistema de ejes ordenados, se encuentra una orientación para la cual todos los  $K_{ij}$  son cero y queda sólo la diagonal del tensor; el sistema de ejes coordenados así orientados se denomina sistema de ejes principales.

En un medio estratificado, la permeabilidad en la dirección vertical es menor que la horizontal; en ese caso, uno de los ejes principales es vertical (el z) y los otros dos son horizontales, ya que normalmente

$$K_y = K_x > K_z$$

Para un sistema de estratos isotrópicos de diferente permeabilidad, la permeabilidad equivalente en sentido perpendicular a la estratificación es:

$$K_v = \frac{B}{\sum_{I=1}^m \left( \frac{b_I}{K_I} \right)}$$

donde

- $K_v$  permeabilidad global vertical
- $m$  número de estratos
- $K_I$  permeabilidad del estrato  $i$
- $b_I$  espesor del estrato  $i$
- $B$  suma de todos los espesores  $b_I$

$$K_H = \frac{1}{B} \sum_{I=1}^m (K_I \cdot b_I)$$

donde

- $K_H$  permeabilidad global horizontal

### III.13 ACUIFEROS LIBRES Y ACUIFEROS CONFINADOS

Un acuífero que tiene como límite superior al nivel freático se le llama acuífero libre.

Un acuífero limitado superiormente por una formación poco permeable y que tiene agua a mayor presión que la atmosférica se le llama acuífero semiconfinado. Si la permeabilidad del material confinante es tan baja que prácticamente no interactúa con el acuífero se dice que éste es confinado.

En pozos que captan acuíferos confinados o semiconfinados, el nivel del agua puede ascender por arriba de la frontera superior del acuífero. La superficie imaginaria definida por los niveles de agua de pozos que penetren este tipo de acuíferos recibe el nombre de superficie piezométrica; sus variaciones corresponden a cambios en la presión a que está sometida el agua en el acuífero y puede encontrarse, en un punto dado, arriba o abajo del nivel freático. Cuando dicha superficie se encuentra arriba de la superficie del terreno, da lugar a pozos brotantes ( pozos Artesianos o Artesianismo). Los acuíferos confinados o semiconfinados pueden transformarse en libres cuando la superficie piezométrica desciende bajo la frontera superior del acuífero. En la fig. 3.1 se muestran esquemáticamente los diferentes tipos de acuíferos.

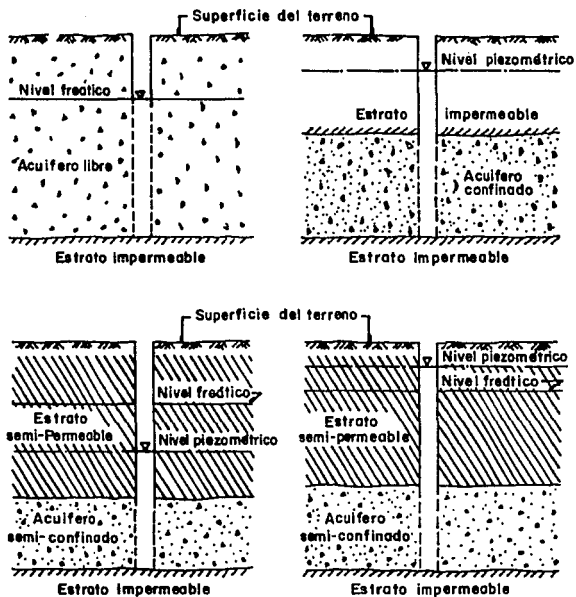


FIGURA 3.1 TIPOS DE ACUIFEROS

A pesar de la diferencia de permeabilidad entre un acuífero y su confinante, el volumen de agua que intercambian llega a ser considerable debido a la gran extensión de su área de contacto, comparada con la del flujo en el acuífero; la extensión de éste se mide longitudinalmente en decenas de kilómetros mientras su espesor es en decenas de metros; también los gradientes que se producen al bombear del acuífero son de por lo menos un orden de magnitud mayores en sentido vertical que en sentido horizontal.

Resulta así que aún cuando la permeabilidad de un estrato confinante sea mil o diez mil veces menor que la del acuífero, el volumen que intercambian es semejante al del flujo en el acuífero.

Existen muchos ejemplos de acuíferos semiconfinados en México; el más conocido es el del valle de México en el que, debido a la fuerte explotación que ha sufrido y al drenado de agua del confinante que se describió, han ocurrido hundimientos del terreno de graves consecuencias; otros ejemplos son los acuíferos de los valles de Guaymas y Hermosillo.

#### III.14 ALMACENAMIENTO ESPECIFICO

Es el volumen de agua que sale por unidad de volumen de un acuífero cuando la carga hidráulica desciende una unidad de longitud (unidades  $L^{-1}$ ). En acuíferos confinados el agua que sale al descender la presión hidráulica (presión de poro) proviene de la expansión elástica de la



propia agua y de la compresión de la estructura sólida que recibe la presión que deja de soportar el agua.

En acuíferos libres el efecto descrito es muy pequeño comparado con el del drenado del material cerca de la superficie freática, de donde proviene el agua que sale del acuífero al descender la carga hidráulica.

Si la estructura sólida del acuífero fuera elástica el almacenamiento específico sería el mismo al aumentar que al disminuir la carga hidráulica; de lo contrario es menor. El almacenamiento específico debido sólo a la expansión del agua es de  $10^{-1} \text{ m}^{-1}$ .

Para obtener el cambio de almacenamiento en un volumen  $V$ , se acepta que tanto la estructura sólida como el agua tienen un comportamiento elástico y que la presión total sobre un punto no cambia y es la debida al peso del sólido y del líquido sobre dicho punto; esto significa que si la presión del agua sufre un decremento, la presión sobre la estructura sólida tendrá un incremento del mismo valor; el decremento en la presión del agua produce una liberación de su masa, al mismo tiempo que un reacondo de la estructura sólida.

Se define como coeficiente de almacenamiento específico,  $S_e$ , a la cantidad de agua liberada por unidad de volumen de material cuando la carga hidráulica decrece en una unidad, es decir, es el volumen de agua liberado del almacenamiento del acuífero debido a la expansión del agua y a la compresión del esqueleto sólido. En términos

de sus componentes se expresa como :

$$S_s = \gamma (\alpha + \eta\beta) \quad (9)$$

donde:

- $\gamma$  peso volumétrico del agua
- $\alpha$  módulo de compresibilidad de la estructura sólida
- $\eta$  porosidad del material
- $\beta$  módulo de compresibilidad del agua (recíproco de su módulo de elasticidad)

### III.15 TRANSMISIVIDAD Y ALMACENAMIENTO

Normalmente, las dimensiones horizontales de los acuíferos son dos o tres de magnitud mayores que su dimension vertical (longitudes de decenas de kilómetros contra espesores de decenas de metros) por lo que es válido tratarlos como si fueran capas con flujo bidimensional. Asociados a esta conceptualización se definen las siguientes características de un acuífero, que son variables en ese espacio plano:

#### III.15A Coeficiente de transmisividad , T

Indica la capacidad del acuífero para transmitir agua horizontalmente en todo su espesor y se define como el

producto del coeficiente de permeabilidad por el espesor saturado del acuífero. Tiene unidades (  $L^2 t^{-1}$  ).

### III.15B Coeficiente de almacenamiento, S

Es la cantidad de agua liberada por una columna de área horizontal unitaria y altura igual al espesor saturado del acuífero, cuando la carga hidráulica decrece en una unidad. Es bidimensional.

En general, para acuíferos confinados o semiconfinados el coeficiente de almacenamiento toma valores muy reducidos en el rango de  $10^{-2}$  a  $10^{-5}$  ; en cambio para acuíferos libres el rango es de 0.05 a 0.30 y es prácticamente igual al rendimiento específico del material situado en el nivel freático. Tiene unidades de área.

A continuación se describe el comportamiento geohidrológico de las rocas siguiendo su clasificación geológica más amplia: volcánicas, sedimentarias y metamórficas.

#### 1) Rocas volcánicas intrusivas y rocas metamórficas

Tienen en su estado original poca porosidad y permeabilidad; sin embargo, cuando afloran están sujetas a intemperismo y cuando sufren esfuerzos tectónicos se fracturan con lo que dichas propiedades aumentan. Si originalmente su porosidad es menor del 1 % llega a aumentar a 30 % por intemperismo y a 5 % por fracturamiento; la permeabilidad puede aumentar en la misma proporción.

Tanto el intemperismo como el fracturamiento disminuyen con la profundidad, desde la superficie del terreno, por lo que las zonas de circulación del agua son de poco espesor.

Una zona fracturada de rocas intrusivas o metamórficas puede ser permeable o impermeable dependiendo de si las fracturas se rellenan con material clástico o no y si este material es de grano grueso o fino.

La exploración por métodos geofísicos es de ayuda para localizar y definir el espesor de una zona intemperizada. Los pozos perforados en estos materiales son en general de bajo rendimiento y un caudal excesivo agota rápidamente el pozo debido al poco almacenamiento del material. La calidad del agua es en general buena, por provenir de agua superficial infiltrada y con poco tiempo de contacto con el material; por la misma razón estos acuíferos son susceptibles de contaminación con aguas residuales de la superficie.

## 2) Rocas volcánicas extrusivas

En estas se incluyen las coladas de lava solidificadas en la superficie, los piroclásticos productos de erupciones violentas (los conos volcánicos están formados por ambos materiales) y los diques.

Las coladas de lava se disponen normalmente como mantos extensos de algunos metros de espesor; sin embargo, se encuentran formaciones muy potentes como consecuencia de

varias coladas superpuestas. Los magmas básicos (basaltos, andesitas) son más fluidos que los ácidos (riolita, dacita) por lo que forman coladas más delgadas, que se enfrían rápidamente y forman vesículas y grietas de contracción, lo que les da porosidad y permeabilidad. La parte superior de una colada es más permeable que la inferior. Cuando pasa mucho tiempo entre dos coladas, se forman entre ambos depósitos que las separan y que rellenan los huecos de las más antiguas; por ésto, las coladas más jóvenes son las más permeables.

Los piroclastos (conglomerados, cenizas y tobas volcánicas) son más permeables entre menos estén soldados sus granos, o sea, entre más frío haya sido el ambiente de su depósito.

La alta permeabilidad y capacidad de infiltración de algunos de estos materiales obliga a que sean aprovechados en lugares bajos, a menos que descansen sobre formaciones impermeables; es por ésto importante determinar los materiales que los subyacen en lo que es de ayuda la geología histórica regional.

El uso de la geofísica en estos materiales es limitado porque se tienen en general pocos contrastes.

En coladas de lava, dada la irregular distribución de las vesículas y de las fracturas, es conveniente perforar pozos por percusión, ya que al utilizar perforadoras rotatorias es difícil y nocivo para el acuífero mantener la circulación cuando se llega de pronto a los huecos. En

materiales piroclásticos, en cambio, es recomendable el uso de rotatorias.

La calidad del agua es buena en las rocas extrusivas, pero por su alta capacidad de infiltración, es fácilmente contaminable.

### 3) Rocas sedimentarias

Son formaciones que se han producido por el depósito de fragmentos de otras rocas que han sido intemperizadas, erosionadas y transportadas por diferentes agentes. A continuación se describirán las formaciones de depósito reciente (cuaternario), no endurecidas, por separado de las que han adquirido cementación entre sus partículas.

#### a) Sedimentos no endurecidos

Comprenden los depósitos de boleas, grava, arena, limo y arcilla y combinaciones de los mismos. La amplia variación en su granulometría les da un rango amplio de porosidad y permeabilidad; la primera varía desde 20 % en depósitos bien graduados de grava y arena hasta 90 % en algunas arcillas, y la segunda desde 0.01 m/s en material grueso mal graduado (uniforme) hasta  $10^{11}$  m/s para arcillas.

De los sedimentos más permeables de este tipo es donde más agua subterránea se extrae actualmente ya que presentan una serie de ventajas entre las que destacan que son fáciles de excavar o perforar, tienen en general

niveles de agua someros en los valles, están cerca del lugar de su uso ya sea en la agricultura o en ciudades y no se contaminan tan fácilmente como los acuíferos en basalto o en calizas.

En los valles de origen fluvial se da toda la gama de granulometrías predomina la del material grueso, especialmente en sus partes más profundas. Esto se debe a que la corriente que cavó inicialmente el valle fué de alta pendiente y arrastró material grueso de su cuenca; al irse rellenando el valle por exceso de material sobre la capacidad de arrastre y por inundaciones durante avenidas, el material depositado se vuelve más fino. Las inundaciones y los cambios de posición del cauce hacen que haya alternancia de capas de material grueso y fino en la estratigrafía. El espesor del sedimento va de 10 a 50 m pero toma valores mayores en las desembocaduras de los ríos. Para la localización de pozos en estos valles es conveniente determinar los límites de la roca basal por métodos geofísicos. La calidad del agua será muy similar a la del río.

En los valles de origen tectónico el espesor de los sedimentos no endurecido suele ser muy grande (cientos y hasta miles de metros) y contener mucha diversidad de materiales de origen fluvial, lacustre, volcánico, eólico, etc. Sin embargo, el interés geohidrológico se cifra en los primeros centenares de metros ya que los depósitos más profundos han sido consolidados, por lo que tienen menor permeabilidad y contienen agua en general salina por su largo tiempo de contacto con los sólidos.

Las fallas que afectan a los sedimentos de estos valles llegan a formar barreras al flujo, ya sea porque la superficie de falla se impermeabilice o porque su movimiento ponga en contacto materiales permeables e impermeables.

Por la diversidad de sedimentos que contienen estos valles, la explotación de agua subterránea en ellos provoca dos efectos adversos que son los hundimientos del terreno, al inducirse flujo de formaciones compresibles, y contaminación con nitratos, fierro y manganeso, si hay mantos de materia orgánica.

Las llanuras costeras son depósitos de sedimento no consolidado de extensión muy variable y cuyo origen puede ser de arrastre de las cordilleras que los limitan, de depósitos marinos (arenas y gravas de playa y lodos de lagunas costeras), por lo que son en general permeables. El mayor peligro en la explotación de acuíferos en estos lugares es el de la intrusión de agua de mar. Casos de Guaymas y Hermosillo.

Otros sedimentos no consolidados menos frecuentes son los de origen eólico, las dunas y los loess; los primeros están formados por arena de tamaño muy uniforme de fina a media y los segundos por tamaños muy finos, característicos de los limos.

#### b) Sedimentos endurecidos

Comprenden la misma graduación de granos que los sedimentos no endurecidos que les dan origen y que han



obtenido algún tipo de cementación por precipitación y cristalización de minerales de la arcilla, de cuarzo o de calcita. Se tienen así los conglomerados, las areniscas, las limolitas y las lutitas correspondiendo a gravas, arenas, limos y arcillas respectivamente. Se agregan a los anteriores sedimentos las evaporitas, las margas, el carbón, las calizas y las dolomitas.

El comportamiento de los sedimentos granulares es similar a sus originales no cementados, sólo que ven disminuidas su porosidad y permeabilidad de uno a tres órdenes de magnitud. Los de grano grueso son los de mayores posibilidades como acuíferos (conglomerados y areniscas) y los de grano fino actúan como acuitardos semiconfinantes al igual que las arcillas. Una diferencia respecto a los sedimentos no endurecidos es que, por su edad, se encuentran afectados por más accidentes tectónicos (fallas, fracturas y plegamientos) lo que les puede dar algo más de permeabilidad. Por su estratificación son anisótropos como los acuíferos en sedimentos no endurecidos.

Las evaporitas y las margas, presentes también en sedimentos no endurecidos, son origen de contaminación del agua subterránea.

La calidad del agua en estos materiales es muy variable, siendo más salina en general la de depósitos más profundos y en zonas desérticas.

Conviene perforar los pozos con máquinas rotatorias y en caso de existir fracturamiento, estimularlo con explosivos.

### c) Rocas carbonatadas kársticas

Son rocas sedimentarias endurecidas de origen marino (calizas y dolomitas) cuyos poros y fisuras han sido ensanchadas mediante el ataque a su carbonato de calcio por el ácido carbónico contenido en el agua y su disolución en ella (karstificación). Este fenómeno es en algunos casos espectacular ya que se forman cavernas de gran tamaño y extensión (Ejemplo: los cenotes en Yucatán). El comportamiento geohidrológico de estas formaciones es similar al de las rocas volcánicas básicas extrusivas.

La porosidad antes de la karstificación es alta en comparación con otras rocas sedimentarias endurecidas y va de un 4 % en calizas compactas a un 30 % en calizas tipo brecha y coquina; sin embargo, la porosidad efectiva aún después de la karstificación no es muy alta y va del 1 % al 25 % .

La permeabilidad de estas formaciones es muy variable dependiendo de su origen, fracturamiento y karstificación; su valor varía entre  $10^{-4}$  m/s a más de  $10^{-7}$  m/s. Se han medido velocidades reales con el uso de trazadores que van de 0.1 a 30 cm/s.

Para identificar las calizas permeables pueden servir indicios como su fracturamiento y el que contengan conductos de disolución. El poder de ataque del agua aumenta con su contenido de bióxido de carbono, que lo adquiere principalmente al pasar por suelos vegetales.

Cuando los sedimentos marinos no son de reciente formación, están afectados por movimientos tectónicos y han emergido del mar en secuencias de capas de espesor considerable; es común en esos casos encontrar intercaladas calizas permeables entre otras menos permeables que forman acuíferos confinados y en ocasiones brotantes. En plegamientos, las zonas más fracturadas son los valles de los sinclinales y las cimas de los anticlinales, por lo que convendrá localizar los pozos en los primeros, si están más bajos, y no en flancos de plegamiento.

La captación de agua se hace en la actualidad principalmente con pozos aunque se usan también galerías filtrantes. En la perforación de pozos existe el mismo problema que en basaltos si se perfora con máquina rotatoria y es la pérdida de circulación al llegar a una zona permeable; por ello, vale aquí también la recomendación de considerar las máquinas de percusión como alternativa de perforación. En muchos casos no es necesario ademar los pozos dada la dureza de la formación.

Debido a lo errático de los conductos de disolución se ha encontrado que los caudales específicos (caudal por metro de abatimiento) de los pozos en las zonas de calizas tienen casi siempre una distribución estadística muy extendida y de tipo logarítmico-normal con valores extremos hasta de más de dos órdenes de magnitud. La profundidad de un pozo en calizas puede aumentarse desarrollando con ácidos o con explosivos; los ácidos se

usan también para rehabilitar pozos incrustados con carbonato de calcio.

Igual que los basaltos, las calizas karstificadas tienen una alta capacidad de infiltración, que en estas últimas se ve incrementada por las depresiones en el terreno que se forman al derrumbarse las cavernas subterráneas. Esto hace que el agua sea en general de buena calidad, con un máximo de 500 mg/l de sólidos totales, pero que sea fácilmente contaminable por descargas residuales de la superficie (aguas negras y retornos de riegos). Caso de Yucatán, en general, y de Mérida en particular.

### III.16 Hidroestratigrafía

La estratigrafía o secuencia de las rocas, depende de los cambios en la forma de disposición.

#### III.16A Medios Continentales

Abanicos aluviales.

A lo largo del pié de las montañas, en las zonas áridas, en donde existen corrientes torrenciales, el relieve abrupto, muestra superficies de falla en donde el tamaño del grano varía fuertemente el cual normalmente decrece paulativamente a medida que se aleja de las zonas altas.

En las regiones húmedas a lo largo de fallas escarpadas o pié de montes, los estratos se encuentran mezclados con rocas intemperizadas y suelos.

En algunas áreas en donde ocurrió un cambio brusco de clima, puede presentarse alteración en la secuencia de depositación.

#### III.16B Depósitos de planicie de inundación.

Estos depósitos difieren de lugar a lugar de acuerdo a la naturaleza del material transportado por el río, pero la distribución de los depósitos es más o menos similar debido al cambio del cauce del río como un resultado del taponamiento de su propia corriente.

Por medio de aerofotografía se pueden detectar los cauces abandonados en forma de herradura y en una sección transversal aparecerán lentes de material cuarzoso.

### III.16C Medios Desérticos

Desde un punto de vista de depósito geomorfológico; el desierto es bastante diferente y en muchos casos constituyen áreas de drenaje interno (cuencas cerradas).

En los desiertos con morfología relativamente joven, se puede ver las montañas, el abanico o bajadas el bolsón. La bajada se forma con abanicos aluviales.

En los bolsones poco profundos temporalmente se forman lagos y pantanos salinos.

En los desiertos de relieve maduro como el SAHARA o Australia central, la depositación por el viento juega el papel más importante, encontrándose grandes áreas cubiertas por dunas cuyo origen proviene de antiguas areniscas.

### III.17 EL Subsuelo Como Un Modelo Hidrogeológico.

Uno de los principales objetivos del estudio geológico de una región es lograr un modelo tridimensional del subsuelo; esto significa el entendimiento de la distribución de los diferentes tipos de roca, tanto horizontal como verticalmente.

El propósito de un estudio hidrogeológico es determinar qué partes de este modelo tridimensional se encuentran saturados de agua y entender los factores geológicos que decidieron la distribución de estos cuerpos y obtener la geometría de las superficies de las zonas saturadas o su potencial equivalente de acuerdo a las deducciones que en cuanto a dirección y cantidad de flujo se puedan inferir.

Mientras que un modelo geológico es estático, excepto en áreas tectónicamente activas, ya que se considera que la distribución espacial de las diferentes unidades de roca en el subsuelo permanecen constantes (al menos durante el tiempo de estudio). El modelo hidrogeológico tiene que considerarse como dinámico ya que cada partícula de agua se encuentra en movimiento y es de esperarse que cambie su lugar en relación a las partículas de roca que se hallan a su alrededor, así como de acuerdo a la geometría y localización dentro de la superficie de la zona saturada, cambiando como una función del tiempo.

Al incluir la dimensión "tiempo" dentro del modelo hidrogeológico habrá que considerarlo como un modelo de cuatro dimensiones.

Además del interés en la distribución y cambios en la localización de las partículas de agua, la investigación hidrogeológica está también interesada en la calidad química del agua como parte constituyente del modelo. Esta calidad, cuantitativamente expresada, puede considerarse como una dimensión adicional en el modelo hidrogeológico.

La ocurrencia y movimiento del agua a través de las formaciones geológicas del subsuelo depende de los siguientes factores:

- a) Clima: actual, reciente y pasado
- b) Naturaleza de las rocas que conforman la región
- c) Estratigrafía, o secuencia y distribución de los diferentes tipos de roca
- d) Estructura geológica, o ubicación espacial de las diferentes unidades estratigráficas
- e) Topografía o morfología de la superficie en la región.

Desde un punto de vista hidrogeológico es posible obtener una serie de mapas que explicarán la distribución y espesor de los acuíferos, estos mapas son los siguientes:

- 1.- Mapa de afloramiento. Este mapa, junto con el de isoyetas, proporcionan las áreas de recarga del acuífero.
- 2.- Mapa estructural. Indica la absoluta altitud de la base del acuífero.
- 3.- Mapa de isopacas. Indica el espesor del acuífero.
- 4.- Mapa litológico. Proporciona los cambios de litología de ciertas capas.
- 5.- Mapas de transmisividades y permeabilidades.

### III.17A Mapas de Nivel Freático

Después de que el agua penetra en el subsuelo, se acumula en un material ubicado sobre una capa impermeable y cambia su dirección de flujo a una casi horizontal. Si el nivel



del agua no se encuentra separado por algún cuerpo entre él y el aire, se le denomina nivel freático fig 3.2 . Si este, está separado y la carga del nivel del agua se encuentra por encima del piso del acuícludo, se denomina nivel piezométrico y al plano que contenga el mismo valor de carga se le conocerá como superficie piezométrica.

Las características geométricas del nivel freático están dadas por los siguientes factores:

- 1) La relación topográfica entre el área de recarga y descarga, tomando como base la distancia entre ellas y la diferencia de altitud.
- 2) Estructura geológica.
- 3) Transmisibilidad y/o permeabilidad.
- 4) Rangos de carga y descarga.

La superficie del nivel freático se obtiene trazando mediante interpolación los valores de la profundidad del nivel freático tomados de las lecturas en los pozos y referidas a un nivel base (nivel del mar), de donde resulta un plano de elevaciones de nivel freático (estático). La dirección del flujo se determina principalmente por la relación geográfica entre el área de recarga y descarga, por lo que el gradiente hidráulico, así como la transmisibilidad, están directamente relacionados con la cantidad de agua que pasa a través del acuífero, definiéndose esta última como el producto del coeficiente de permeabilidad por el espesor saturado del acuífero.

De esta manera, si en una cierta región se observa una variación del nivel freático se puede deducir un cambio

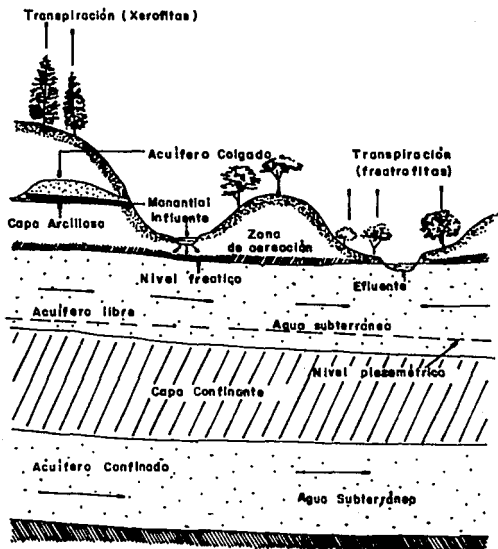


FIGURA 3.2 OCURRENCIA DEL AGUA SUBTERRANEA  
(NIVEL FREÁTICO Y NIVEL PIEZOMÉTRICO)

en la litología o en el espesor del acuífero o un cambio en la cantidad de agua producido por una adición o disminución de ésta.

En áreas donde no existe adición o disminución, el acuífero es combinado y el cambio es abrupto y se considera solo un cambio en la permeabilidad y/o espesor del acuífero afectando a la transmisibilidad.

Solamente en un acuífero en el que la velocidad del agua sea uniforme es posible hablar de una superficie no curva; mientras que en la naturaleza, dadas las variaciones que ésta generalmente presenta, el plano y su sección son parabólicas o elípticas.

De las condiciones anteriormente expuestas, en diferentes estructuras geológicas se tendrán diferentes posiciones del nivel freático; esto estará establecido por :

a.- Espesor y profundidad del acuífero.

En caso que se tenga una capa intermedia impermeable entre la cima y la base del acuífero, se establecerá un acuífero colgado. fig 3.3

b.- Topografía y su relación con la zona de descarga y recarga.

c.- Clima. En las áreas más húmedas hay más posibilidad de un nivel freático alto (somero).

d.- Existencia de fuentes de recarga como corrientes influentes, o bien, corrientes efluentes alimentadas por agua subterráneas. fig 3.4

e.- Estructuras geológicas.

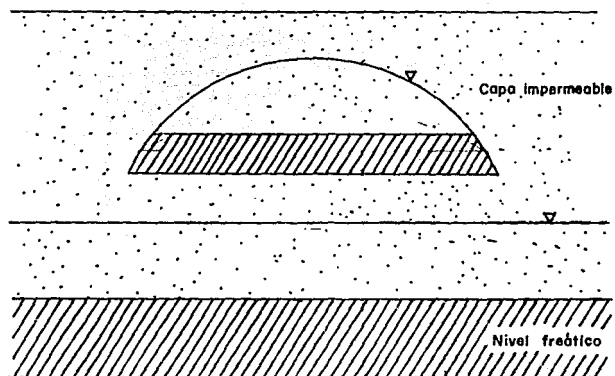


FIGURA 3.3 ACUIFERO COLGADO

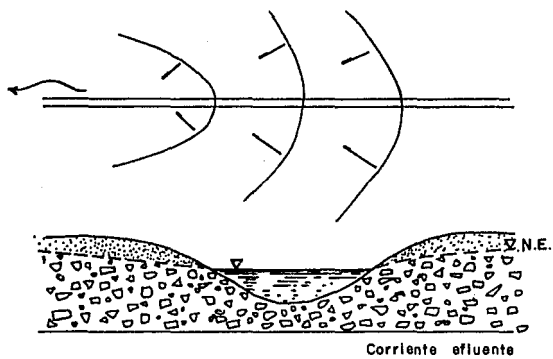
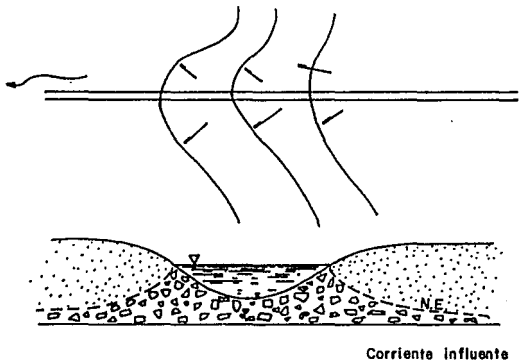


FIGURA 3.4 TIPOS DE CORRIENTES

### III.18 Plegamientos: anticlinales y sinclinales.

Ya que existen capas expuestas en el centro de los anticlinales, se tendrá el agua en la dirección de las líneas estructurales, pudiéndose hablar de un flujo dividido. fig 3.5

### III.19 Fallas

En las fallas, principalmente normales, se presentan cambios en el gradiente debido a los cambios en la litología de las rocas. Si la zona de falla es altamente permeable, el gradiente descenderá en la zona de falla y viceversa. fig. 3.6 y 3.7

Las fallas pueden causar levantamientos del nivel freático por adición de agua de acuíferos confinados y algunas veces escalonamientos de acuíferos colgados. fig 3.8

Desde el punto de vista hidrogeológico, del desarrollo de fallas en áreas sometidas a esfuerzos de compresión, comúnmente resultan zonas restrictivas de reducida permeabilidad; por el contrario, las áreas sometidas a esfuerzos de tensión, producen fracturas y aberturas por donde el agua puede moverse.

Las fallas, al provocar el desplazamiento de formaciones permeables y poner en contacto estas con otras impermeables, pueden llegar a definirse como límites de acuíferos. En muchos lugares el flujo se vierte a la superficie por medio

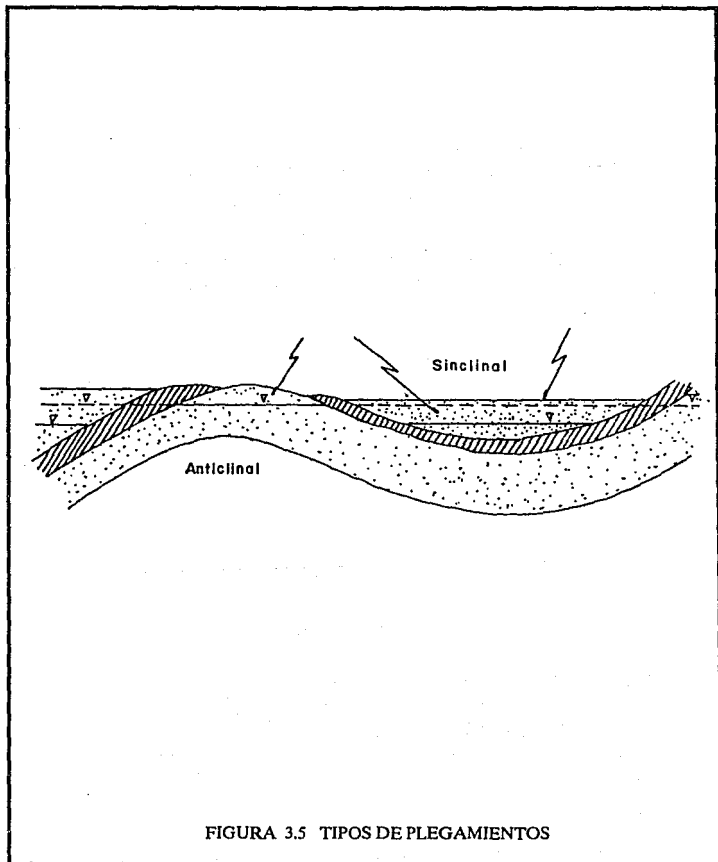


FIGURA 3.5 TIPOS DE PLEGAMIENTOS

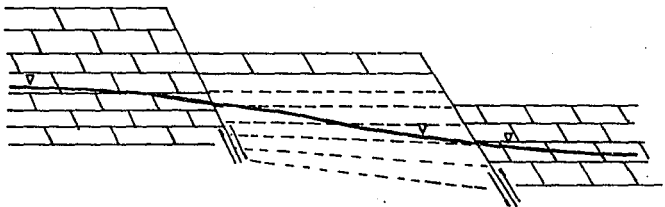


FIGURA 3.6 FALLA NORMAL



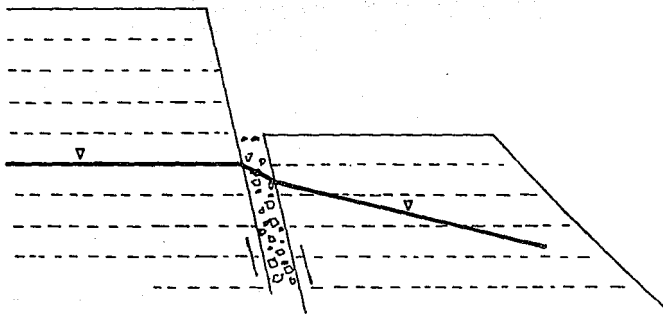
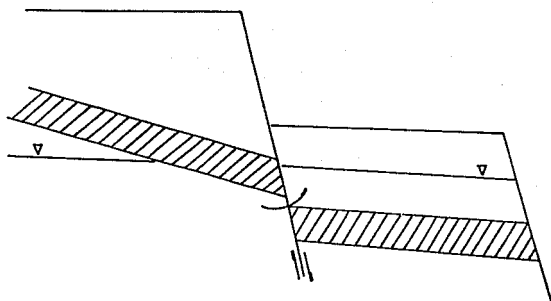
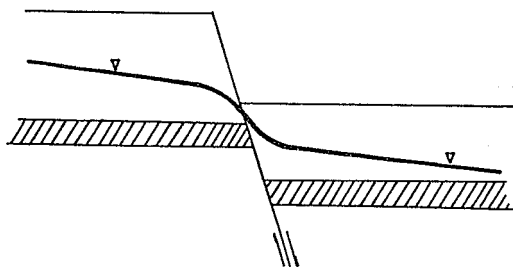


FIGURA 3.7 FALLA ALTAMENTE PERMEABLE



Acción de las fallas en acuíferos confinados



Acción de las fallas en acuíferos colgados

FIGURA 3.8 ESCALONAMIENTO EN ACUIFEROS

de la falla, dando lugar a un manantial. En otros lugares las fallas constituyen una barrera al movimiento.

### III.20 Manantiales.

Un manantial es el afloramiento de agua cuando se intercepta el nivel freático con la superficie de la tierra. Los manantiales son importantes para el estudio del régimen de flujo ya que proporcionan una idea de la altitud del nivel freático y de la naturaleza del acuífero al observar las cantidades de agua que proporciona, las variaciones de su caudal, salinidad, etc. En la fig 3.9 se presenta el origen de diferentes manantiales.

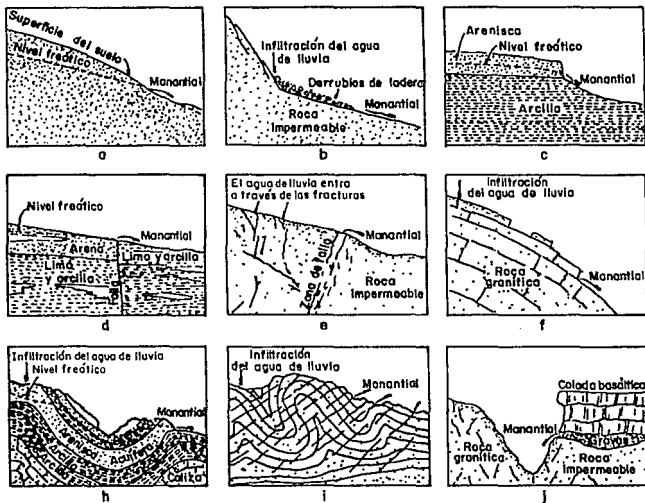


FIGURA 3.9 ORIGEN DE LOS MANANTIALES

## C A P I T U L O   I V

### B A L A N C E   D E   A G U A   S U B T E R R A N E A

La cuantificación del agua subterránea existente en una zona dada, es un problema que se ha tratado de resolver por varios métodos, entre los que se cuenta, el análisis del ciclo hidrológico y la aplicación de coeficientes de infiltración a formaciones geológicas que afloran en las zonas estudiadas; sin embargo, 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 utilizando un método que trabaje directamente con ellos, considerando el agua ya infiltrada y relativamente al margen de los fenómenos que ocurren en la superficie; dicho método recibe el nombre de BALANCE DE AGUA SUBTERRANEA.

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 presente 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 así, hacer el uso racional de los mismos.

#### IV.1 Ecuación de balance.

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 aguas subterráneas" y su forma más simple es la siguiente:

$$\text{Recarga} - \text{Descarga} = \text{Cambio de Almacenamiento} \quad (1)$$

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

$$E_h + R - S_h - D - B - E_v = V \quad (2)$$

Dependiendo de como se presente la recarga y extracción o explotación de un acuífero en estudio durante un intervalo de tiempo dado, los términos de la ecuación (2) pueden o no aparecer. En el caso de acuíferos limitados totalmente por fronteras impermeables,  $E_h$  y  $S_h$ , no aparecerán, ya que no existe entrada y salida de flujo subterráneo; si no existen niveles freáticos someros  $E_v$  puede eliminarse, lo mismo que  $D$ , en el caso de que no existan afloramientos. 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.

Como el volumen llovido en una zona dada, una parte se infiltra en el subsuelo recargando a los acuíferos en cierto grado que depende de las condiciones geológicas y climatológicas del lugar; este volumen de agua que se infiltra no es posible cuantificarlo indirectamente, por lo que es necesario determinarlo del estudio del comportamiento del acuífero frente a la acción combinada de su recarga y descarga.

La cuantificación del potencial de un acuífero se basa en la evolución de los niveles del agua subterránea en un cierto intervalo de tiempo, de la distribución y cuantía de los volúmenes de extracción por bombeo en ese mismo intervalo, de sus características hidrodinámicas obtenidas mediante pruebas de bombeo y de la determinación de la red de flujo subterráneo. El fenómeno de la recarga de un acuífero, se presenta en forma cíclica por lo que para su cuantificación es necesario obtener información por lo menos durante un año, determinándose con esto, un valor preliminar; sin embargo, la recarga no es constante en el tiempo, sino que varía de un año a otro, dependiendo de las condiciones naturales y artificiales que influyen en

el comportamiento de los acuíferos, por lo que para obtener un valor medio de recarga anual, es necesario considerar varios años.

Cuando ya se conoce el valor de la recarga media anual de una zona, es posible pasar a la etapa llamada de predicción, que tiene como finalidad predecir mediante modelos matemáticos o analógicos, previamente calibrados, el comportamiento futuro de los niveles del agua subterránea según las alternativas de explotación que se deseen estudiar.

#### IV.2 Piezometría

La piezometría en los acuíferos se refiere a la medición de las fluctuaciones que se presentan en los niveles del agua subterránea, producidos tanto por causas 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 referencias y los puntos observados.

La obtención de las lecturas piezométricas y su debida interpretación son el punto de partida para un estudio cuantitativo del agua subterránea, por lo que al tomarlos debe tenerse cuidado de que no están afectados por factores que puedan invalidarlos.

Del procesamiento de los datos piezométricos pueden obtenerse diferentes 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.

#### IV.3 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 a los ascensos y descensos que se presentan a causas naturales y artificiales tales como la precipitación y las extracciones en la época de bombeo.

#### IV.4 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.

El plano de profundidades al nivel estático, da una idea de la profundidad mínima a que deben perforarse los pozos y además permite seleccionar zonas apropiadas para la exploración desde el punto de vista de costos de bombeo.

#### IV.5 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 del brocal de los pozos de observación en los cuales se toma la profundidad al nivel estático.

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

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. También debe tenerse muy en cuenta que los valores que se consideran en una configuración, corresponden a un mismo acuífero y no a otros diferentes; lo anterior se evita, obteniendo secciones geológicas que muestren las principales unidades geohidrológicas existentes en el subsuelo; asimismo, deben

conocerse las características constructivas de los pozos de observación, para definir el acuífero en que se encuentran.

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 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. 4.1

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

$$v = K \frac{h}{L} = Ki \quad (3)$$

en la que  $v$  es la velocidad media de flujo,  $h$  es la pérdida

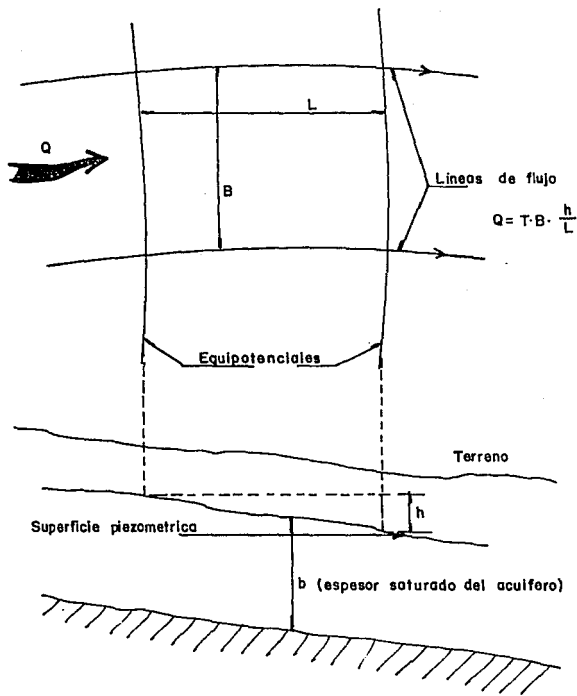


FIGURA 4.1 RED DE FLUJO

de recarga en la distancia  $L$ ,  $i$  es el gradiente hidráulico y  $K$  es el coeficiente de permeabilidad.

Con estos elementos se puede cuantificar el caudal de flujo

que se encuentra en una sección limitada por dos líneas equipotenciales y dos líneas de corriente. Considerando la ley de continuidad y la ley de Darcy tenemos:

$$Q = Av = A K \frac{h}{L} \quad (4)$$

en la que  $A$  es el área de flujo. Utilizando el concepto de transmisibilidad, expresado como el coeficiente de permeabilidad multiplicado por el espesor del acuífero ( $T=Kb$ ), obtenemos :

$$Q = TB \frac{h}{L} = TBi \quad (5)$$

en la que  $T$  es la transmisibilidad y  $B$  es el ancho medio de flujo.

La evolución piezométrica se refiere a los cambios que sufre el nivel estático durante un intervalo de tiempo, producidos por la acción 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 pueden 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.

## C A P I T U L O   V

### H I D R A U L I C A   D E   P O Z O S

El flujo del agua subterránea puede evaluarse cuantitativamente conociendo la velocidad, presión, densidad, temperatura y viscosidad del agua infiltrada a través de una formación geológica. Estas características del agua constituyen generalmente las incógnitas del problema y pueden variar en cada punto de la formación y con el tiempo. Si las incógnitas dependen únicamente de las variables independientes  $x, y,$  y  $z,$  el movimiento se presenta con régimen establecido; si por el contrario, las incógnitas son también función del tiempo, el régimen es transitorio. El flujo con régimen establecido, se puede considerar como un caso particular del flujo con régimen transitorio cuando el tiempo tiende a infinito; o bien, como su promedio a lo largo de un periodo de tiempo dado.

El movimiento del agua subterránea se llama confinado, o cautivo, cuando los límites o superficies confinantes del medio a través del que circula el agua (es decir, el espacio comprendido por los poros llenos de agua), permanecen fijos para los diferentes estados del movimiento; por el contrario, el flujo del agua es libre, cuando posee una superficie libre, cuya posición con el estado del movimiento; en ocasiones también suele llamársele movimiento en condiciones freáticas.

Un medio recibe el nombre de isótropo si sus propiedades en toda dirección, a partir de cualquier punto, son las

mismas; por el contrario se llama anisótropo si alguna de sus propiedades es afectada en cualquier dirección a partir de un punto. El medio es de composición heterogénea si su naturaleza, propiedades o condiciones de isotropía, varían de un punto a otro y es homogéneo si estas características son constantes en el medio.

#### V.1 Ecuación de movimiento

La ecuación general que gobierna el movimiento del agua subterránea, puede deducirse a partir de la ley de Darcy la cual se puede escribir, en forma general como:

$$V = K \frac{\partial h}{\partial L} \quad (1)$$

donde L es la distancia a lo largo de la dirección media del flujo.

Si se considera que un acuífero es homogéneo con permeabilidad isotrópica, los componentes de velocidad en un sistema de coordenadas rectangulares están dados, de acuerdo con la ecuación 1 por:

$$V_x = K \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = K \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2)$$

En hidrodinámica, un potencial de velocidad  $\phi$ , se define como una función de espacio y tiempo, tal que su derivada



negativa, con respecto a cualquier dirección, es la velocidad del fluido en esa dirección. Entonces, si  $\phi = -Kh$ , de la ecuación 2, se deduce que:

$$v_x = -\frac{\partial\phi}{\partial x}, \quad v_y = -\frac{\partial\phi}{\partial y}, \quad v_z = -\frac{\partial\phi}{\partial z} \quad (3)$$

lo cual indica que existe un potencial de velocidades para el flujo de agua subterránea.

## V.2 Flujo establecido

La ecuación de continuidad, en su forma general, puede expresarse como:

$$\left[ \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial\rho}{\partial t} \quad (4)$$

donde  $\rho$ , es la densidad del fluido y  $t$  es el tiempo. Considerando que el agua es incompresible, su densidad será constante; entonces, la ecuación de continuidad para éste caso será:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

sustituyendo la ecuación 3 y reemplazando por  $-Kh$ , se llega a:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad \text{ó} \quad \nabla^2 h = 0 \quad (6)$$

Esta es la ecuación general para flujo establecido en un medio homogéneo e isótropo.

### V.3 Flujo Transitorio

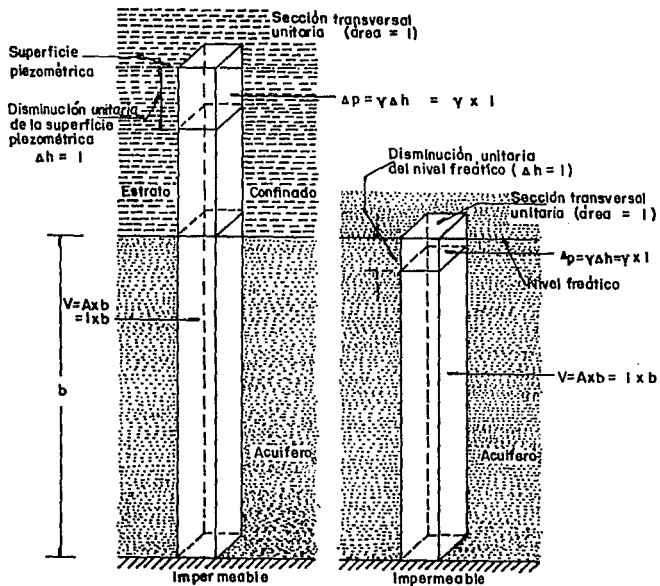
Para deducir la ecuación correspondiente al flujo transitorio, es necesario considerar el coeficiente de almacenamiento  $S$ , lo que para un acuífero libre representa su rendimiento específico, y para uno confinado una medida de su compresibilidad, la cual se define por la expresión:

$$\beta = - \frac{\partial V/V}{\partial p} \quad (7)$$

donde  $V$ , es el volumen y  $p$  la presión, lo cual puede valuarse en términos del cambio dentro de una columna de sección transversal unitaria, extendiéndose a través del acuífero confinado fig. 5.1

Si  $b$  es el espesor del acuífero, se tiene que  $V = 1$ ,  $b=b$ , y el cambio de presión es  $\partial p = -\gamma(1) = -\gamma$ ; además,  $S = \partial V$ , por lo que la ecuación 7 se transforma en  $\beta = \frac{S}{\gamma b}$  para un material elástico se tiene que :

$$\frac{\partial V}{V} = - \frac{\partial p}{p} \quad (8)$$



(a) Acuífero confinado (b) Acuífero no confinado

FIGURA 5.1 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

De las ecuaciones 7 y 8 se deduce :  $\partial p = \rho \beta \partial p$  y sustituyendo  $\beta$  por la expresión  $\beta = \frac{S}{\gamma b}$  se obtiene:

$$\partial p = \frac{\rho S}{b \gamma} \partial p \quad (9)$$

Sustituyendo este resultado la ecuación 4 se encuentra:

$$-\left[ \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} \right] = \frac{\rho S}{b \gamma} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (10)$$

Considerando  $\rho$  constante, teniendo en cuenta la ecuación 5 y expresando a  $p = \gamma h$  se llega a :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{Kb} \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\delta \quad \nabla^2 h = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (11)$$

que es una ecuación diferencial parcial, que gobierna el flujo transitorio del agua en un acuífero confinado compresible de espesor uniforme. Esta ecuación puede usarse mediante aproximaciones sucesivas en un acuífero libre, donde las variaciones del espesor saturado son pequeñas.

#### V.4 Pruebas de Bombeo

La realización de las pruebas de bombeo, tiene como fin

determinar las características hidráulicas de los acuíferos, y consisten en observar los efectos (abatimiento) provocados por el bombeo en los niveles piezométricos de un acuífero. Los abatimientos pueden ser observados en el mismo pozo de bombeo, o bien, en pozos de observación próximos a él.

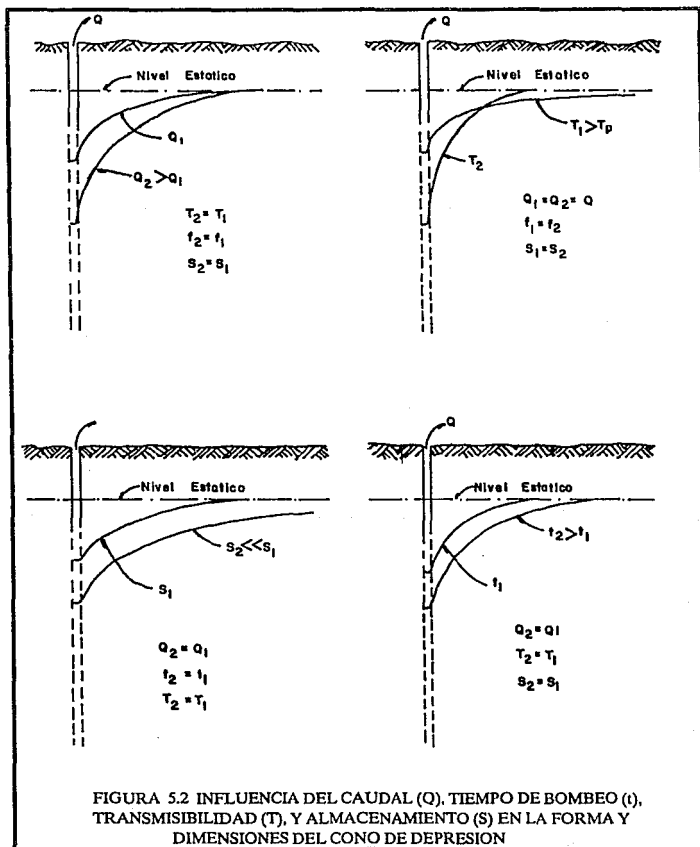
Un pozo es una estructura hidráulica cuyo funcionamiento, cuando está debidamente diseñado y construido, depende del comportamiento del acuífero, por lo cual es fundamental conocer las características hidrodinámicas de éste, mediante pruebas de bombeo.

Al iniciarse el bombeo en un pozo, el nivel del agua en las vecindades sufre un abatimiento, que resulta mayor en el pozo mismo y decrece a medida que la distancia al pozo aumenta, hasta que llega a un punto en que el bombeo no afecta a dicho nivel. La fuerza que induce al agua a que se mueva hacia el pozo, es la carga hidráulica representada por la diferencia entre el nivel del agua dentro del pozo y el existente en cualquier lugar fuera de él.

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 del 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.

La influencia de algunos de estos factores en la forma de la depresión piezométrica, se muestran en la fig. 5.2

Cuando se bombea agua mediante un pozo, ésta se deriva del almacenamiento del acuífero, y en tanto no exista una recarga vertical, el cono de depresión se va extendiendo más y más, hasta que la superficie piezométrica se estabiliza en la proximidades del pozo y se llega a una condición de flujo establecido.



## V.5 Pruebas de Bombeo con Régimen Establecido

Existen dos ecuaciones básicas para un pozo descargando bajo condiciones de flujo establecido; una para acuíferos libres y otra para acuíferos confinados. Para un acuífero libre, la ecuación es: fig 5.3

$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi K} L \frac{r_2}{r_1} \quad (12)$$

en la cual :  $h_1$  = altura piezométrica a la distancia  $r_1$  del pozo de bombeo.

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

$Q$  = gasto de bombeo.

$K$  = permeabilidad

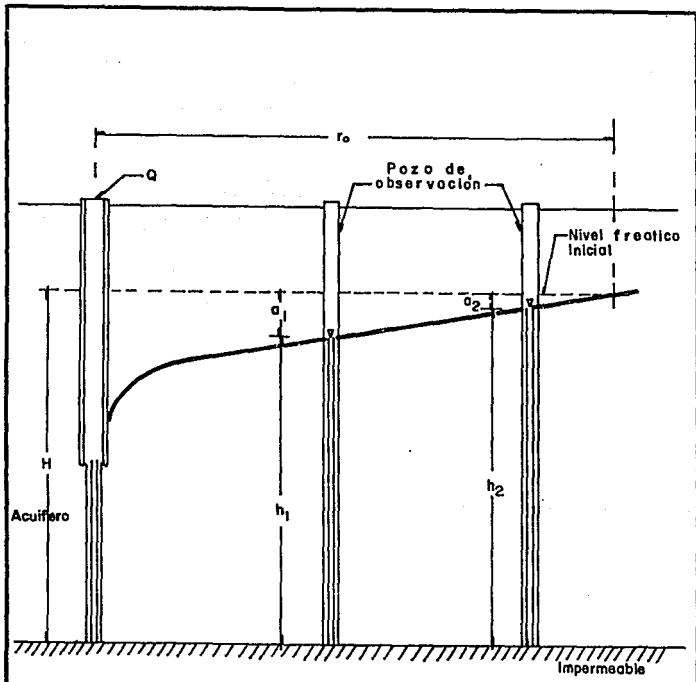
$L$  = logaritmo base "e"

La ecuación correspondiente a un acuífero confinado es : fig 5.4

$$h_1 - h_2 = \frac{Q}{2\pi Kb} L \frac{r_1}{r_2} \quad (13)$$

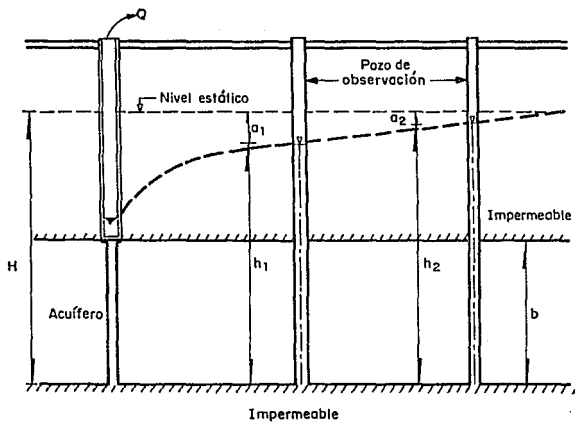
en el cual :  $b$  es el espesor del acuífero, y los demás términos son los mismos que se describieron en la ecuación anterior.





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

FIGURA 5.3 REGIMEN DE FLUJO ESTABLECIDO HACIA POZOS EN UN ACUIFERO LIBRE



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

FIGURA 5.4 RÉGIMEN DE FLUJO ESTABLECIDO HACIA POZOS EN UN ACUÍFERO CONFINADO

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

- a) El acuífero es homogéneo e isótropo en el área afectada por el bombeo.
- b) El espesor saturado inicial del acuífero libre, es constante.
- c) Para el acuífero confinado, el espesor es constante.
- d) El pozo penetra totalmente al acuífero.
- e) La superficie piezométrica (ó freática) es horizontal antes de iniciarse el bombeo.
- f) El abatimiento y el radio de influencia no varía con el tiempo.
- g) El flujo es laminar.

Estas hipótesis parecen limitar seriamente la aplicabilidad de ambas ecuaciones, pero en 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 establecido, después de cierto tiempo de bombeo puede considerarse como tal en una área próxima al pozo de bombeo.

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

Para un acuífero libre:

$$K = \frac{Q}{\pi (h_2^2 - h_1^2)} L \frac{r_2}{r_1} \quad (14)$$

Para un acuífero confinado:

$$K = \frac{Q}{2\pi b(h_1 - h_2)} L \frac{r_1}{r_2} \quad (15)$$

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 casos 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.

#### V.6 Pruebas de Bombeo en Régimen Transitorio

Theis desarrolló la ecuación para el régimen transitorio en 1935, en la cual por primera vez se tomó en cuenta el

efecto del tiempo de bombeo. Mediante esta ecuación 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 solo 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 es a costa del almacenamiento del acuífero.
- e) El pozo penetra totalmente al acuífero.
- f) El agua del acuífero es liberada instantáneamente con el abatimiento.

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

$$a = \frac{Q}{4 \pi T} W(u) \quad (16)$$

en donde:

a = abatimiento a la distancia r del pozo de bombeo.

Q = gasto de bombeo.

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

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

En la expresión anterior :

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (17)$$

- r = distancia al pozo de bombeo.
- t = tiempo de bombeo.
- S = coeficiente de almacenamiento.
- T = transmisibilidad.

Los valores de la función de pozo W(u) en relación con los de las presiones de poro u, se encuentran en la tabla 5.1 los cuales vaciados en una gráfica de W(u) contra 1/u en papel logarítmico, dan una curva tipo para interpretar pruebas de bombeo en pozos totalmente penetrantes en acuíferos confinados. fig. 5.5

Con base a las fórmulas 16 y 17, Theis desarrolló un método gráfico de solución para determinar los parámetros T y S, siguiendo el orden:

- a) Trazar la curva tipo W(u)-1/u en papel con trazado doble logarítmico.
- b) Construir la gráfica abatimiento-tiempo (cuando se tiene un solo pozo de observación), con los datos obtenidos en el campo.

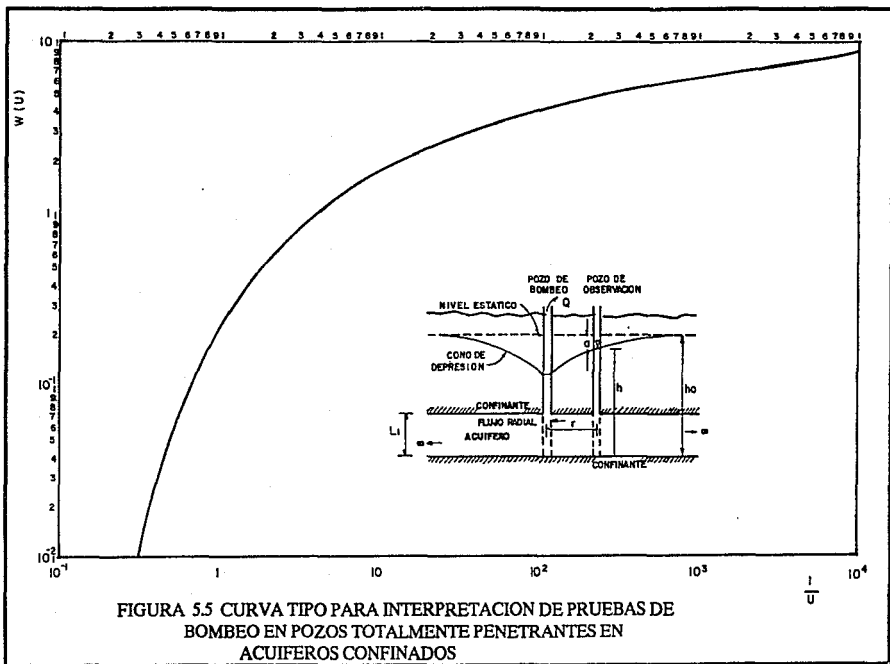


Tabla 5.1 Función  $W(u, r/B)$ 

u	r/B	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005
0			14.0474	12.6611	11.8502	11.2748	10.8286
0.000001	13.2383	13.0031	12.4417	11.8153	11.2711	10.8283	
0.000002	12.5451	12.4240	12.1013	11.6716	11.2259	10.8174	
0.000003	12.1397	12.0581	11.8322	11.5098	11.1462	10.7849	
0.000004	11.8520	11.7905	11.6168	11.3597	11.0555	10.7374	
0.000005	11.6289	11.5795	11.4384	11.2248	10.9642	10.6822	
0.000006	11.4465	11.4503	11.2866	11.1040	10.8764	10.6240	
0.000007	11.2924	11.2570	11.1545	10.9951	10.7933	10.5652	
0.000008	11.1589	11.1279	11.0377	10.8962	10.7151	10.5072	
0.000009	11.0411	11.0135	10.8059	10.8059	10.6416	10.4508	
0.00001	10.9357	10.9109	10.8382	10.7228	10.5725	10.3963	
0.00002	10.2426	10.2301	10.1932	10.1332	10.0522	9.9530	
0.00003	9.8371	9.8288	9.8041	9.7635	9.7081	9.6392	
0.00004	9.5495	9.5432	9.5246	9.4940	9.4520	9.3992	
0.00005	9.3263	9.3213	9.3064	9.2818	9.2480	9.2052	
0.00006	901440	9.1398	9.1274	9.1069	9.0785	9.0426	
0.00007	8.9899	8.9863	8.9756	8.9580	8.9336	8.9027	
0.00008	8.8563	8.8532	8.8439	8.8284	8.8070	8.7798	
0.00009	8.7386	8.7358	8.7275	8.7138	8.6947	8.6703	
0.0001	8.6332	8.6308	8.6233	8.6109	8.5938	8.5717	
0.0002	7.9402	7.9390	7.9352	7.9290	7.9203	7.9092	
0.0003	7.5346	7.5340	7.5313	7.5274	7.5216	7.5141	
0.0004	7.2472	7.2466	7.2447	7.2416	7.2373	7.2317	
0.0005	7.0242	7.0237	7.0222	7.0197	7.0163	7.0118	
0.0006	6.8420	6.8416	6.8403	6.8383	6.8353	6.8316	
0.0007	6.6879	6.6876	6.6865	6.6848	6.6823	6.6970	
0.0008	6.5545	6.5542	6.5532	6.5517	6.5495	6.5467	
0.0009	6.4368	6.4365	6.4357	6.4344	6.4324	6.4299	
0.001	6.3315	6.3313	6.3305	6.3293	6.3276	6.3253	
0.002	5.6394	5.6393	5.6389	5.6383	5.6374	5.6363	
0.003	5.2349	5.2348	5.2346	5.2342	5.2336	5.2329	
0.004	4.9482	4.9482	4.9480	4.9477	4.9472	4.9467	
0.005	4.7261	4.7260	4.7259	4.7256	4.7253	4.7249	
0.006	4.5448	4.5448	4.5447	4.5444	4.5441	4.5438	
0.007	4.3916	4.3916	4.3915	4.3913	4.3910	4.3908	
0.008	4.2591	4.2590	4.2590	4.2588	4.2586	4.2583	
0.009	4.1423	4.1423	4.1422	4.1420	4.1418	4.1416	





Tabla 5.1 Continuación

u	r/B	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.035
0		9.4425	8.6319	8.0569	7.6111	7.2471	6.9394
0.000001							
0.000002							
0.000003	9.4425						
0.000004	9.4422						
0.000005	9.4413						
0.000006	9.4394						
0.000007	9.4361	8.6319					
0.000008	9.4313	8.6318					
0.000009	9.4251	8.6316					
0.00001	9.4176	8.6313	8.0569				
0.00002	9.2961	8.6152	8.0558	7.6111	7.2471		
0.00003	9.1499	8.5737	8.0483	7.6101	7.2470		
0.00004	9.0102	8.5168	8.0320	7.6069	7.2465	6.9394	
0.00005	8.8827	8.4533	8.0080	7.6000	7.2450	6.9391	
0.00006	8.7673	8.3880	7.9786	7.5894	7.2419	6.9384	
0.00007	8.6625	8.3233	7.9456	7.5754	7.2371	6.9370	
0.00008	8.5669	8.2603	7.9105	7.5589	7.2305	6.9347	
0.00009	8.4792	8.1996	7.8743	7.5402	7.2222	6.9316	
0.0001	8.3983	8.1414	7.8375	7.5199	7.2122	6.9273	
0.0002	7.8192	7.6780	7.4972	7.2898	7.0685	6.8439	
0.0003	7.4534	7.3562	7.2281	7.0759	6.9068	6.7276	
0.0004	7.1859	7.1119	7.0128	6.8929	6.7567	6.6088	
0.0005	6.9750	6.9152	6.8346	6.7357	6.6219	6.4964	
0.0006	6.8009	6.7508	6.6828	6.5988	6.5011	6.3923	
0.0007	6.6527	6.6096	6.5508	6.4777	6.3023	6.2962	
0.0008	6.5237	6.4858	6.4340	6.3695	6.2935	6.2076	
0.0009	6.4094	6.3757	6.3294	6.2716	6.2032	6.1256	
0.001	6.3069	6.2765	6.2347	6.1823	6.1202	6.0494	
0.002	5.6271	5.6118	5.5907	5.5636	5.5314	5.4939	
0.003	5.2267	5.2166	5.2025	5.1845	5.1627	5.1373	
0.004	4.9421	4.9345	4.9240	4.9105	4.8941	4.8749	
0.005	4.7212	4.7152	4.7068	4.6960	4.6829	4.6675	
0.006	4.5407	4.5357	4.5287	4.5197	4.5088	4.4960	
0.007	4.3882	4.3839	4.3779	4.3702	4.3609	4.3500	
0.008	4.2561	4.2524	4.2471	4.2404	4.2323	4.2228	
0.009	4.1396	4.1363	4.1317	4.1258	4.1186	4.1101	



Tabla 5.1 Continuación

u	r/B	0.04	0.045	0.05	0.055	0.06	0.065
0		6.6731	6.4383	6.2285	6.0388	5.8658	5.7067
0.000001							
0.000002							
0.000003							
0.000004	6.6731						
0.000005	6.6730						
0.000006	6.6729	6.4383					
0.000007	6.6726	6.4382	6.2285				
0.000008	6.6719	6.4381	6.2284				
0.000009	6.6709	6.4378	6.2283				
0.00001	6.6693	6.4372	6.2282	6.0388	5.8658	5.7067	
0.00002	6.6242	6.4143	6.2173	6.0338	5.8637	5.7059	
0.00003	6.5444	6.3623	6.1848	6.0145	5.8527	5.6999	
0.00004	6.4538	6.2955	6.1373	5.9818	5.8309	5.6860	
0.00005	6.3626	6.2236	6.0821	5.9406	5.8011	5.6648	
0.00006	6.2748	6.1512	6.0239	5.8948	5.7658	5.6383	
0.00007	6.1917	6.0807	5.9652	5.8468	5.7274	5.6081	
0.00008	6.1136	6.0129	5.9073	5.7982	5.6873	5.5755	
0.00009	6.0401	5.9481	5.8509	5.7500	5.6465	5.5416	
0.0001	5.9711	5.8864	5.7965	5.7026	5.6058	5.5071	
0.0002	5.4516	5.5407	5.3538	5.2991	5.2411	5.1803	
0.0003	5.1084	5.0762	5.0408	5.0025	4.9615	4.9180	
0.0004	4.8530	4.8286	4.8016	4.7722	4.7406	4.7068	
0.0005	4.6499	4.6302	4.6084	4.5486	4.5590	4.5314	
0.0006	4.4814	4.4649	4.4467	4.4267	4.4051	4.3819	
0.0007	4.3374	4.3233	4.3077	4.2905	4.2719	4.2518	
0.0008	4.2118	4.1994	4.1957	4.1707	4.1544	4.1368	
0.0009	4.1004	4.0894	4.0772	4.0638	4.0493	4.0336	
0.001	6.3069	6.2765	6.2347	6.1823	6.1202	6.0494	
0.002	5.6271	5.6118	5.5907	5.5636	5.5314	5.4939	
0.003	5.2267	5.2166	5.2025	5.1845	5.1627	5.1373	
0.004	4.9421	4.9345	4.9240	4.9105	4.8941	4.8749	
0.005	4.7212	4.7152	4.7068	4.6960	4.6829	4.6675	
0.006	4.5407	4.5357	4.5287	4.5197	4.5088	4.4960	
0.007	4.3882	4.3839	4.3779	4.3702	4.3609	4.3500	
0.008	4.2561	4.2524	4.2471	4.2404	4.2323	4.2228	
0.009	4.1396	4.1363	4.1317	4.1258	4.1186	4.1101	



Tabla 5.1 Continuación

u	r/B	0.006	0.007	0.008	0.009	0.001
0		10.4640	10.1557	9.8887	9.6532	9.4425
0.000001		10.4640	10.1557	9.8887		
0.000002		10.4619	10.1554	9.8886	9.6532	
0.000003		10.4509	10.1523	9.8879	9.6530	9.4425
0.000004		10.4291	10.1436	9.8849	9.6521	9.4422
0.000005		10.3993	10.1290	9.8786	9.6496	9.4413
0.000006		10.3640	10.1094	9.8686	9.6540	9.4394
0.000007		10.3255	10.0862	9.8555	9.6382	9.4361
0.000008		10.2854	10.0602	9.8398	9.6292	9.4313
0.000009		10.2446	10.0324	9.8219	9.6182	9.4251
0.00001		10.2038	10.0034	9.8024	9.6059	9.4176
0.00002		9.8386	9.7126	9.5781	9.4383	9.2961
0.00003		9.5583	9.4671	9.3674	9.2611	9.1499
0.00004		9.3366	9.2653	9.1863	9.1009	9.0102
0.00005		9.1542	9.0957	9.0304	8.9591	8.8827
0.00006		8.9996	8.9500	8.8943	8.8332	8.7673
0.00007		8.8654	8.8224	8.7739	8.7204	8.6625
0.00008		8.7470	8.7090	8.6661	8.6186	8.5669
0.00009		8.6411	8.6071	8.5686	8.5258	8.4792
0.0001		8.5453	8.5145	8.4796	8.4407	8.3983
0.0002		7.8958	7.8800	7.8619	7.8416	7.8192
0.0003		7.5051	7.4945	7.4823	7.4686	7.4534
0.0004		7.2249	7.2169	7.2078	7.1974	7.1859
0.0005		7.0063	6.9999	6.9926	6.9843	6.9750
0.0006		6.8271	6.8218	6.8156	6.8086	6.8009
0.0007		6.6752	6.6706	6.6653	6.6594	6.6527
0.0008		6.5433	6.5393	6.5347	6.5295	6.5237
0.0009		6.4269	6.4233	6.4192	6.4146	6.4094
0.001		6.3226	6.3194	6.3157	6.3115	6.3069
0.002		5.6350	5.6334	5.6315	5.6294	5.6257
0.003		5.2320	5.2310	5.2297	5.2283	5.2267
0.004		4.9460	4.9453	4.9443	4.9433	4.9421
0.005		4.7244	4.7237	4.7230	4.7222	4.7212
0.006		4.5433	4.5428	4.5422	4.5415	4.5407
0.007		4.3904	4.3899	4.3894	4.3888	4.3882
0.008		4.2580	4.2576	4.2572	4.2567	4.2561
0.009		4.1313	4.1410	4.1406	4.1401	4.1396

Tabla 5.1 Continuación

u	r/B	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01
0.01		4.0371	4.0368	4.0364	4.0360	4.0356
0.02		3.3543	3.3542	3.3540	3.3538	3.3536
0.03		2.9589	2.9588	2.9587	2.9585	2.9584
0.04		2.6810	2.6810	2.6809	2.6808	2.6807
0.05		2.4678	2.4677	2.4676	2.4676	2.4675
0.06		2.2952	2.2952	2.2951	2.2950	2.2950
0.07		2.1507	2.1507	2.1507	2.1506	2.1506
0.08		2.0269	2.0268	2.0268	2.0268	2.0267
0.09		1.9187	1.9186	1.9186	1.9186	1.9185
0.1		1.8229	1.8228	1.8228	1.8228	1.8227
0.2		1.2226	1.2226	1.2226	1.2226	1.2226
0.3		0.9057	0.9057	0.9056	0.9056	0.9057
0.4		0.7024	0.7024	0.7024	0.7024	0.7024
0.5		0.5598	0.5598	0.5598	0.5598	0.5598
0.6		0.4544	0.4544	0.4544	0.4544	0.4544
0.7		0.3738	0.3738	0.3738	0.3738	0.3738
0.8		0.3106	0.3106	0.3106	0.3106	0.3106
0.9		0.2602	0.2602	0.2602	0.2602	0.2602
1.0		0.2194	0.2194	0.2194	0.2194	0.2194
2.0		0.0489	0.0489	0.0489	0.0489	0.0489
3.0		0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130
4.0		0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038
5.0		0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011
6.0		0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
7.0		0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
8.0		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabla 5.1 Continuación

u	r/B	0.07	0.075	0.08	0.085	0.09	0.10
0		5.5596	5.4228	5.2950	5.1750	5.0620	4.8541
0.000001							
0.000002							
0.000003							
0.000004							
0.000005							
0.000006							
0.000007							
0.000008							
0.000009							
0.00001							
0.00002							
0.00003							
0.00004							
0.00005							
0.00006							
0.00007							
0.00008							
0.00009							
0.0001	5.5596	5.4228	5.2950				
0.0002	5.5593	5.4227	5.2949	5.1750	5.0620		
0.0003	5.5562	5.4212	5.2942	5.1747	5.0619	4.8541	
0.0004	5.5476	5.4160	5.2912	5.1730	5.0610	4.8539	
0.0005	5.5330	5.4062	5.2848	5.1689	5.0585	4.8530	
0.0006	5.5134	5.3921	5.2749	5.1621	5.0539	4.8510	
0.0007	5.4902	5.3745	5.2618	5.1526	5.0741	4.8478	
0.0008	5.4642	5.3542	5.2461	5.1406	5.0381	4.8430	
0.0009	4.4364	5.3317	5.2282	5.1266	5.0272	4.8368	
0.001	5.4075	5.3078	5.2087	5.1109	5.0133	4.8292	
0.002	5.1170	5.0517	4.9848	4.9166	4.8475	4.7079	
0.003	4.8722	4.8243	4.7746	4.7234	4.6707	4.5622	
0.004	4.6710	4.6335	4.5942	4.5533	4.5111	4.4230	
0.005	4.5022	4.4713	4.4389	4.4050	4.3699	4.2960	
0.006	4.3573	4.3311	4.3036	4.2747	4.2446	4.1812	
0.007	4.2305	4.2078	4.1839	4.1588	4.1326	4.0771	
0.008	4.1180	4.0980	4.0769	4.0547	4.0315	3.9822	
0.009	4.0169	3.9991	3.9802	3.9603	3.9395	3.8952	



Tabla 5.1 Continuación

u	r/B	0.07	0.075	0.08	0.085	0.09	0.10
0	5.5596	5.4228	5.2950	5.1750	5.0620	4.8541	
0.000001							
0.000002							
0.000003							
0.000004							
0.000005							
0.000006							
0.000007							
0.000008							
0.000009							
0.00001							
0.00002							
0.00003							
0.00004							
0.00005							
0.00006							
0.00007							
0.00008							
0.00009							
0.0001	5.5596	5.4228	5.2950				
0.0002	5.5593	5.4227	5.2949	5.1750	5.0620		
0.0003	5.5562	5.4212	5.2942	5.1747	5.0619	4.8541	
0.0004	5.4642	5.4160	5.2912	5.1730	5.0610	4.8539	
0.0005	5.5330	5.4062	5.2848	5.1689	5.0585	4.8530	
0.0006	5.5134	5.3921	5.2749	5.1621	5.0539	4.8510	
0.0007	5.4902	5.3745	5.2618	5.1526	5.0741	4.8478	
0.0008	5.4642	5.3542	5.2461	5.1406	5.0381	4.8430	
0.0009	4.4364	5.3317	5.2282	5.1266	5.0272	4.8368	
0.001	5.4075	5.3078	5.2087	5.1109	5.0133	4.8292	
0.002	5.1170	5.0517	4.9848	4.9166	4.8475	4.7079	
0.003	4.8722	4.8243	4.7746	4.7234	4.6707	4.5622	
0.004	4.6710	4.6335	4.5942	4.5533	4.5111	4.4230	
0.005	4.5022	4.4713	4.4389	4.4050	4.3699	4.2960	
0.006	4.3573	4.3311	4.3036	4.2747	4.2446	4.1812	
0.007	4.2305	4.2078	4.1839	4.1588	4.1326	4.0771	
0.008	4.1180	4.0980	4.0769	4.0547	4.0315	3.9822	
0.009	4.0169	3.9991	3.9802	3.9603	3.9395	3.8952	

- c) Superponer 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 16 y 17 y despejar los valores de T y S.

En la fig 5.6 se presentan las 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 representan 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 gasto puede variar de manera apreciable 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.

#### V.7 Fórmula modificada para pruebas de bombeo con Régimen Transitorio.

Trabajando con la fórmula de Theis, Jacob encontró que para tiempos largos ( $t > 5 S r^2 / T$ ), los valores de u resultan lo suficientemente pequeños para que la fórmula 16, pueda modificarse sin ningún error significativo a la fórmula siguiente:

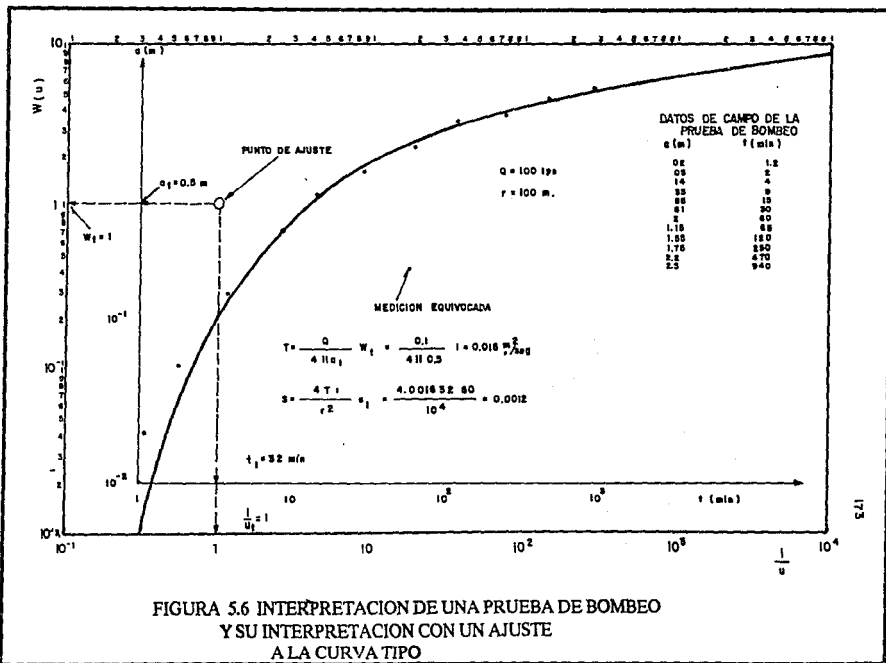


FIGURA 5.6 INTERPRETACION DE UNA PRUEBA DE BOMBEO  
 Y SU INTERPRETACION CON UN AJUSTE  
 A LA CURVA TIPO

$$a = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (18)$$

A partir de esta ecuación, 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 (escala logarítmica).

b) Pasar una recta por los puntos que se alinean y determinar su pendiente. Los puntos correspondientes a los primeros minutos de la prueba generalmente 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 :

$$T = \frac{0.183Q}{m} \quad (19)$$

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:

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \quad (20)$$

En la fig 5.7 se muestra una aplicación del método cuando se tiene un solo 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 (en la escala aritmética) contra la distancia (en escala logarítmica). Los coeficientes buscados se obtiene mediante las fórmulas:

$$T = \frac{0.366Q}{m} \quad \text{y} \quad S = \frac{2.25Tt}{r_0^2} \quad (21)$$

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

La forma más general del método, se aplica cuando se tienen observaciones en varios pozos de observación para diferentes tiempos. En este caso, los valores de la relación  $t/r^2$  se anotan en el eje logarítmico, y se sigue la secuela descrita anteriormente.

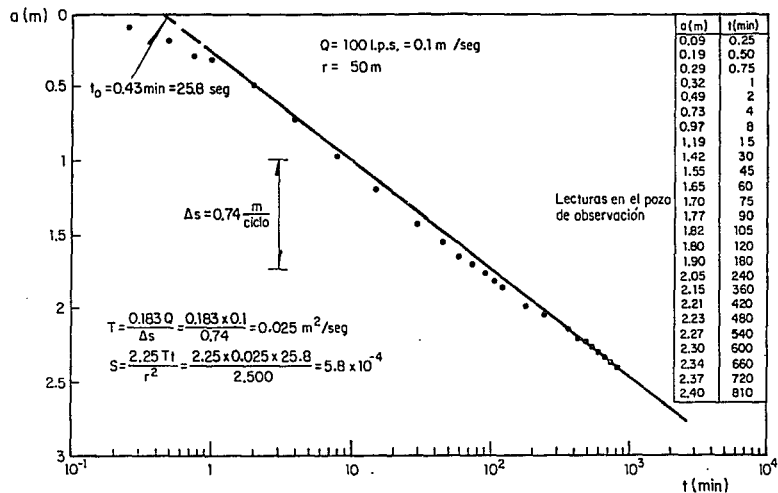


FIGURA 5.7 INTERPRETACIÓN DE UNA PRUEBA DE BOMBEO  
 POR EL MÉTODO DE JACOB

## V.8 Acuíferos Semiconfinados con Flujo Vertical

En las secciones anteriores se presentaron las ecuaciones de flujo en acuíferos confinados, supuesto el caudal de extracción constante o bien descenso constante, pero siempre bajo hipótesis de capas confinantes impermeables (o de permeabilidad muy pequeña), que o ceden agua de almacenamiento y suponiendo, que era despreciable la componente vertical del flujo; sin embargo, como se analizó en el capítulo III, 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, el cual se agrega posteriormente al flujo horizontal del acuífero principal, dando lugar a lo que se llama un acuífero semiconfinado fig 5.8. Las ecuaciones de solución para este tipo de acuíferos de extensión infinita, cuyas capas confinantes rezumen agua (expulsión del agua por los poros), desde o hacia el acuífero, se plantea a continuación.

### V.8.1 Método de la curva tipo para flujo no establecido

$$v^2 h - \frac{K'}{Kbb'} (h - H) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (22)$$

Hantush y Jacob resolvieron la ecuación 22 para un acuífero homogéneo e isótropo, de extensión infinita y completamente penetrado por un pozo de diámetro infinitesimal, siguiendo las mismas hipótesis que Theis, complementadas con los

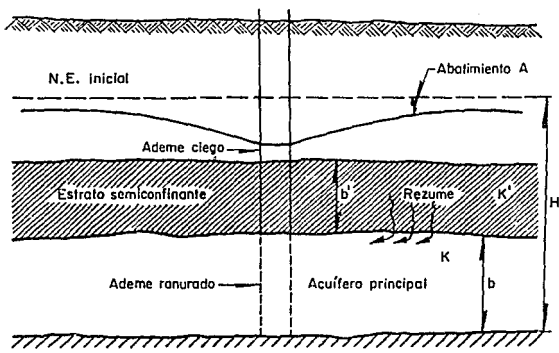


FIGURA 5.8 ACUÍFERO SEMICONFINADO



conceptos de recarga lineal, carga constante del agua estancada que abastece la recarga y refracción horizontal de ésta, siendo la solución:

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

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

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$B = \sqrt{KB} \sqrt{b^2/K} = \sqrt{Tb^2/K} \quad (23)$$

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. fig 5.9

#### V.8.2 Método gráfico de Hantush para acuíferos semiconfinados.

a) Graficar el abatimiento medio en un pozo de observación contra el tiempo en minutos, en papel semilogarítmico y extrapolar los datos hasta que el "a<sub>max</sub>" máximo abatimiento.

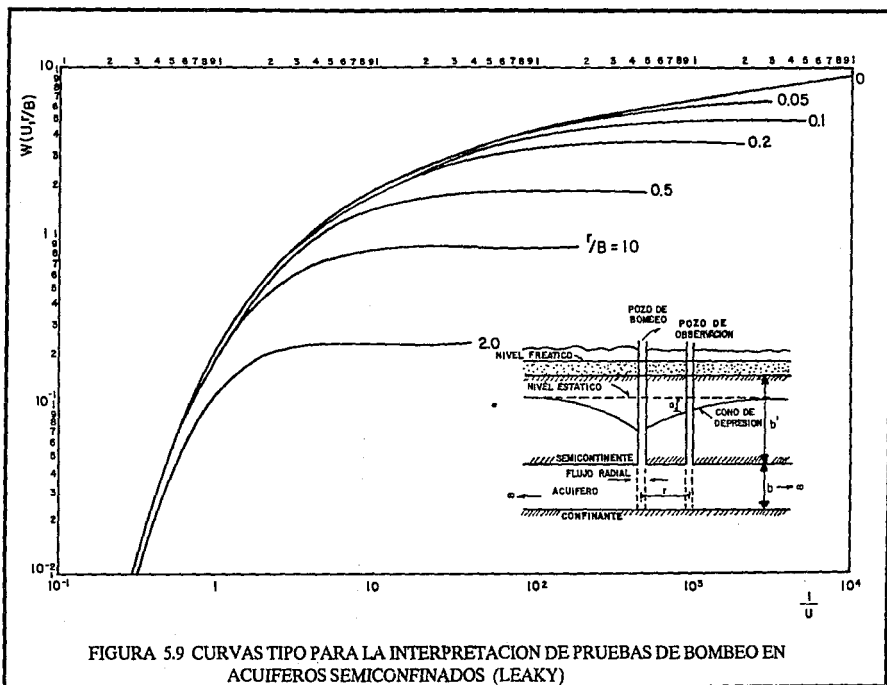


FIGURA 5.9 CURVAS TIPO PARA LA INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO EN ACUIFEROS SEMICONFINADOS (LEAKY)

b) Localizar el punto de inflexión en la curva de abatimiento, tomando  $a_i = a_{\max}/2$ , en donde  $a_i$  es el abatimiento en el punto de inflexión.

c) Determinar gráficamente la pendiente  $m_i$  de la curva de abatimiento en el punto de inflexión y leer el tiempo  $t_i$  correspondiente al tiempo de inflexión.

d) Como se comprueba en el apéndice A del libro Geohydrology de De Wiest

$$e^{r/b} K_0 \frac{r}{B} = \frac{2.3 a_i}{m_i} \quad (24)$$

los valores de la función  $e^x K_0(x)$  en donde  $x = r/B$ , han sido trabajados por Hantush. Aquí la función está determinada por la relación  $2.3 a_i/m_i$ . El valor del argumento, llamado  $r/B$ , puede determinarse mediante la tabla B.1 del apéndice B del mismo libro, con lo cual se determina el valor de B (tabla 5.2).

e) Calcular T, por el hecho de que la pendiente  $m_i$  de la curva en el punto de inflexión, está dada por:

$$m_i = \frac{2.3Q}{4\pi T} e^{-r/B} \quad (25)$$

f) En el punto de inflexión  $u_i = \frac{r^2 S}{4 \times 60 T t_i}$  de esta relación se puede obtener S.

g) Finalmente el recargamiento (rezume)  $K'/b'$  se obtiene de la siguiente forma:

$$B = \sqrt{\frac{T}{K'/b'}} \quad \text{con } B \text{ y } T \text{ determinados.} \quad (26)$$

Las condiciones de los acuíferos, en ocasiones se muestran afectados por factores que invalidan las hipótesis en que se basan las expresiones matemáticas que reflejan su comportamiento. A continuación se mencionan algunos de ellos:

1) Recarga de un río

La estabilización del cono de depresión, alrededor de un pozo de bombeo puede deberse a diferentes causas, entre ellas la recarga de los ríos o los lagos. fig 5.10

En la gráfica abatimiento-tiempo fig 5.11, en la primera parte del período de bombeo, el cono de depresión no se ha extendido hasta el río y los efectos de la recarga no son evidentes, presentándose una sola pendiente. Al extenderse el cono de depresión por abajo del lecho del río, se genera un gradiente hidráulico entre el agua subterránea del acuífero y la de la corriente superficial, infiltrándose el agua de ésta a través de su fondo permeable, si se encuentran conectados hidráulicamente, recargándose así el acuífero con un gasto que aumenta a medida que crece el cono de depresión. Cuando dicho gasto es igual al de la descarga del pozo, tanto el cono como el nivel de bombeo se estabilizan.

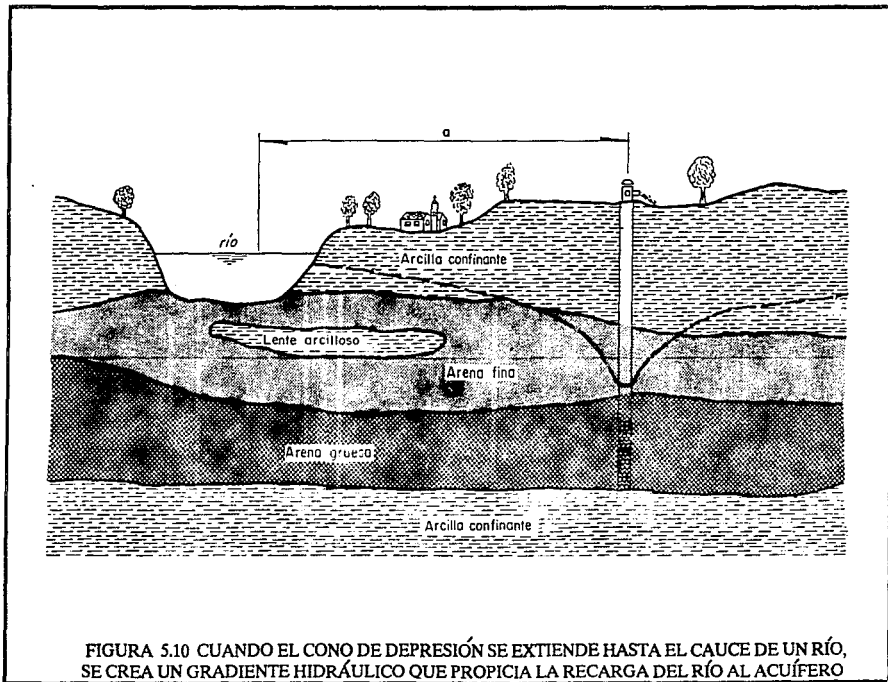


FIGURA 5.10 CUANDO EL CONO DE DEPRESIÓN SE EXTIENDE HASTA EL CAUCE DE UN RÍO, SE CREA UN GRADIENTE HIDRÁULICO QUE PROPICIA LA RECARGA DEL RÍO AL ACUÍFERO

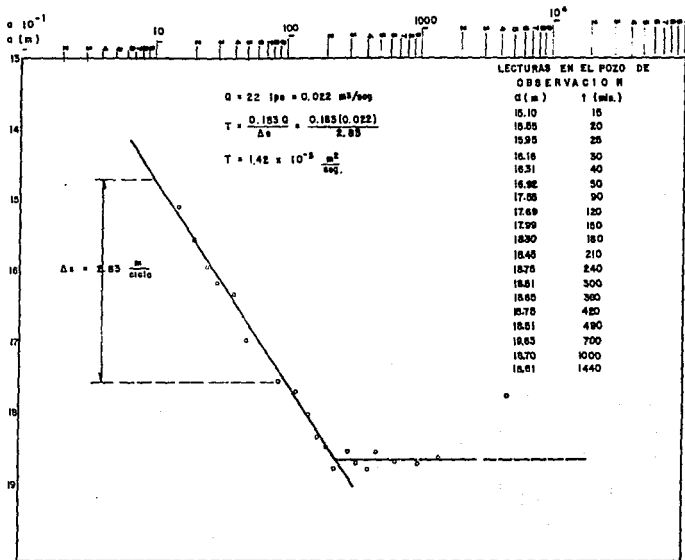


FIGURA 5.11 EFECTO DE UNA RECARGA AL ACUIFERO, CUANDO EL CAUDAL DE ESTA IGUALA AL DE DESCARGA EN EL POZO DE BOMBEO

#### b) Recarga por infiltración vertical

Otra de las situaciones, mediante la cual se establecen las condiciones de equilibrio, es aquella en donde se presenta una recarga vertical en toda el área de influencia de un pozo de bombeo. Lo más común, es el escurrimiento vertical del agua que existe entre los estratos saturados, que se encuentran encima de un acuífero. El material del estrato superior en la zona de saturación, a menudo tiene una permeabilidad considerablemente inferior a la de los materiales más profundos, en los cuales el pozo termina; esta diferencia puede ser tal, que la parte superior no se considera como parte del acuífero.

La diferencia de presión producida por el bombeo, hace que después de un cierto tiempo, los estratos superiores empiecen a aportar, llegando a igualar el caudal de recarga en el pozo, alcanzándose así el equilibrio. La situación anterior puede representarse también en formaciones lenticulares, en donde únicamente la parte inferior de todo el espesor puede ser aprovechada.

#### c) Efecto de la pendiente del nivel freático

En ocasiones se tiene el caso de una estabilización virtual del nivel de bombeo, al presentarse un fuerte gradiente hidráulico en la pendiente del nivel freático o en la superficie piezométrica, que causa distorsión en el cono de depresión, el cual, si antes era circular, se transforma

en elíptico. La mayor parte del agua que resulta del bombeo en el pozo, proviene de la parte superior de la corriente, antes de fluir en todas direcciones.

d) Fronteras impermeables

En realidad pocos acuíferos se apegan a la consideración básica de extensión infinita en todas las direcciones alrededor de un pozo de bombeo, ya que por lo general la geología y las fronteras hidráulicas, limitan a los acuíferos.

Los efectos de una frontera impermeable en las gráficas de abatimiento-tiempo, son inversos a los de la recarga a un acuífero. La frontera ocasiona que la pendiente de la gráfica aumente en lugar de disminuir, debido a que el agua que abastece al pozo se deriva del almacenamiento del acuífero. fig 5.12

e) Otros sistemas de flujo

Hay ocasiones en que los datos graficados en las curvas abatimiento-tiempo, no se ajustan a la curva tipo Theis; esto se debe a que algunas de las hipótesis consideradas no se cumplen, por lo que el método descrito no es aplicable.

Buscando resolver el problema anterior, diversos autores obtuvieron ecuaciones para otros sistemas de flujo tales como: penetración parcial, acuíferos freáticos, acuíferos de extensión limitada, acuíferos con anisotropía, etc..



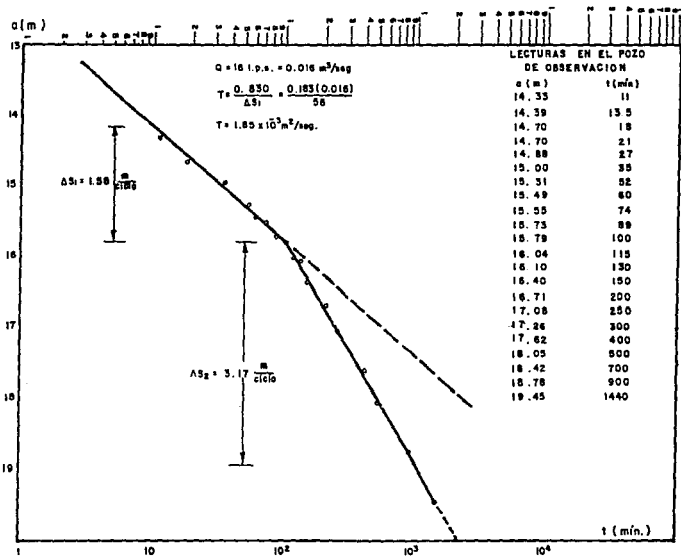


FIGURA 5.12 EFECTO DE UNA FRONTERA IMPERMEABLE QUE SE ENCUENTRA DENTRO DEL RADIO DE INFLUENCIA DEL POZO DE BOMBEO

La solución matemática de estos sistemas resulta complicada, por lo que, para interpretación de una prueba de bombeo realizada en cualquiera de ellos, se utilizan métodos gráficos semejantes a los que se describieron anteriormente, y en los cuales deberá usarse la curva tipo que corresponda al caso que se desea analizar. En las figs 5.13 y 5.14 se presentan las curvas tipo correspondientes a los casos de penetración parcial y acuíferos freáticos respectivamente.

**Acuífero no confinado o freático:** es aquel en donde el agua subterránea tiene una superficie libre, abierta a la atmósfera que se denomina nivel freático.

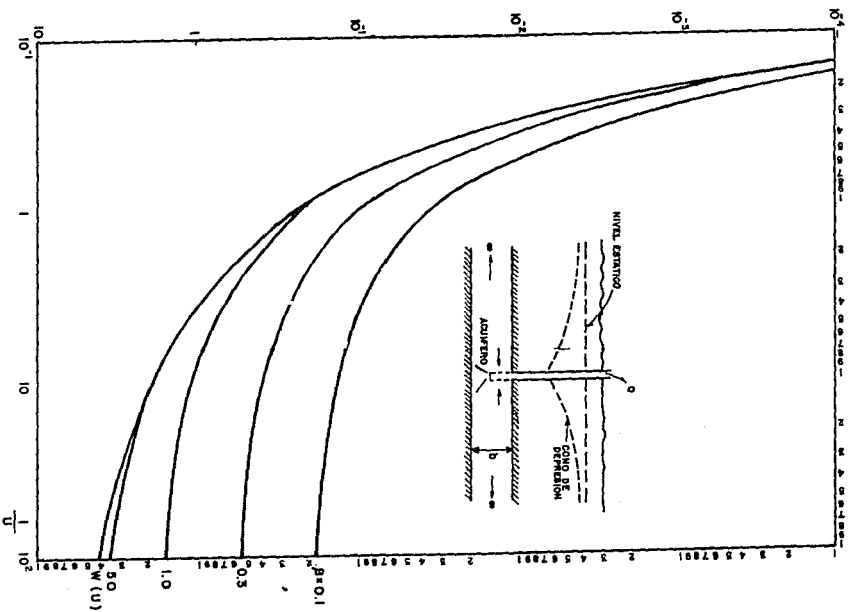


FIGURA 5.13 CURVAS PARA LA INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO EN POZOS PARCIALMENTE PENETRANTES

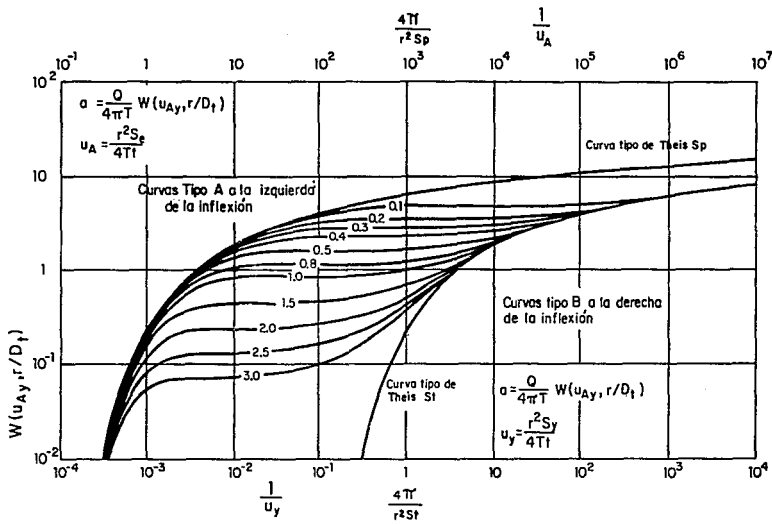


FIGURA 5.14 CURVAS TIPO PARA ACUÍFEROS FREÁTICOS (LIBRES), CON POZOS TOTALMENTE PENETRANTE Y DESCARGA CONSTANTE

## V.8A HIDROGEOQUIMICA

Para conocer la calidad del agua y determinar cualitativamente el comportamiento de los acuíferos en un estudio geohidrológico se incluye como parte integrante la Geoquímica del agua o Hidrogeoquímica.

Se puede definir a la Geoquímica como la ciencia que estudia el comportamiento de los diferentes elementos químicos, su distribución, combinaciones entre sí y sus migraciones en el ámbito de la corteza terrestre.

La Hidrogeoquímica se limita al estudio de los aspectos geoquímicos del agua en sí, y al de las relaciones existentes entre éstas y las rocas de la corteza terrestre.

El estudio hidrogeoquímico es necesario ya que la disponibilidad del agua, no solo depende del volumen almacenada en el acuífero, sino de la calidad de la misma en función con el uso al que pretende destinársele, luego es necesario conocer la distribución espacial de los diferentes tipos y calidades de agua que se encuentra almacenado en los acuíferos; paralelamente es posible en ocasiones conocer el funcionamiento geohidrológico de la zona en estudio.

El agua químicamente pura no existe en la naturaleza; su carácter disolvente, la capacidad para actuar sobre gases, sólidos y líquidos, se refleja en una cierta "impureza", por lo que toda el agua, no importa su estado ni la fuente de la cual proceda, se encuentra cargada en mayor o menor grado de sustancias en solución, generalmente sales y gases.

El comportamiento químico del agua dependerá del grado de solubilidad y la composición de las rocas por las que circula, así como de los factores que afectan la solubilidad, tales como: la previa composición química del agua, el tiempo y área de contacto del agua con las formaciones, la temperatura del agua y de las rocas, la longitud del recorrido, las velocidades de circulación a través de las distintas formaciones.

Un estudio hidrogeoquímico consiste en la toma de muestras de agua de diversas fuentes (pozos, norias, manantiales, etc.), escogidas previamente para su análisis químico, con el fin de conocer primeramente la distribución de calidades y posteriormente observar los cambios que ocurran tanto en el espacio como en el tiempo; en muchos casos es posible relacionar los cambios con las condiciones climatológicas, el funcionamiento geohidrológico, los resultados de un estudio geofísico, etc.

#### V.8B Principales procesos hidrogeoquímicos.

Existen diversos procesos naturales que deben tomarse en cuenta en un estudio hidrogeoquímico; dichos procesos han sido resumidos por Hanshaw y Back, 1965 y son los siguientes:

- a) El viento sobre los océanos lleva tierra adentro: sodio, cloruros y otras sustancias.
- b) El agua al condensarse disuelve nitrógeno, oxígeno y bióxido de carbono de la atmósfera, elementos que llegan al suelo cuando llueve o neva.

c) El agua que se infiltra a través de suelos ricos en materia orgánica, disuelve cantidades adicionales de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

d) Disuelve minerales y libera aniones y cationes.

e) Oxida minerales sulfurosos para proveer sulfatos y algunos otros constituyentes.

f) Los cationes en solución son intercambiados con los existentes en suelos y rocas.

g) Los sulfatos en solución son reducidos bacteriológicamente formándose  $\text{CO}_2$ .

h) Cuando determinadas sales alcanzan la sobresaturación, se precipitan minerales.

i) Por evaporación y evapotranspiración el agua retorna a la atmósfera, dejando productos químicos; otra parte regresa al océano como escurrimiento superficial o por descarga subterránea, arrastrando en ambos casos, sólidos disueltos y posiblemente materia en suspensión.

#### V.8C Muestreo.

La mayor parte de los materiales con que se trabaja en hidrogeoquímica, son heterogéneos y anisótropos, por lo que, pueden encontrarse diferencias considerables en la composición química del agua, tanto vertical como horizontalmente, en los almacenamientos de agua subterránea;

así, aún cuando existe una tendencia general hacia la asociación o la mezcla, el agua puede estar afectada por incrementos localizados de determinados iones. Luego, la obtención de muestras representativas dependerá grandemente de la técnica de muestreo.

Los principales factores a considerar en un programa de muestreo de agua para análisis químico, exceptuando limitaciones de carácter administrativo, son los siguientes:

1. Importancia y calidad del estudio.
2. Complejidad hidrogeológica del área.
3. Extensión superficial.
4. Cantidad y calidad de datos disponibles de este tipo.
5. Zonas en las cuales se conoce la existencia de agua de mala calidad o en las que se considera probable que así ocurra.
6. Número probable de acuíferos de acuerdo con los cortes litológicos de los aprovechamientos con que se cuente.
7. Número de pozos disponibles con características constructivas y de operación conocidas.
8. Resultados de las medidas de resistividad obtenidas en el campo durante el levantamiento del censo de aprovechamientos subterráneos.
9. Cantidad de trabajo de laboratorio.
10. Condiciones locales de la zona.
11. Tipo y distribución de los aprovechamientos.
12. Interrelación entre aguas superficiales y subterráneas.
13. Distribución de los volúmenes de bombeo.

Con respecto a cada muestra individual, es necesario que sea obtenida con los siguientes datos:



- a) El material del recipiente donde se colectará la muestra, deberá ser de vidrio o polietileno.
- b) El volumen de la muestra deberá ser suficiente para un análisis químico completo, entre 1 y 2 litros.
- c) El frasco deberá enjuagarse con agua de la fuente a muestrear, dos o tres veces antes de proceder al muestreo.
- d) La botella se deberá llenar completamente para evitar la gasificación que puede alterar la composición química de la muestra.
- e) Cuando la fuente a muestrear sea un pozo de bombeo equipado, es necesario que el tiempo transcurrido entre la toma de la muestra y el inicio del bombeo sea por lo menos de dos horas.
- f) Las fuentes de muestreo deberán de numerarse en el campo y localizarse en un plano.
- g) Deben de tomarse en el campo las medidas correspondientes al pH, temperatura del agua y la resistividad.
- h) A cada muestra deberá adherirse una etiqueta como la que se muestra en la fig 5.15, con el mayor número posible de los datos anotados en ella.

En los renglones de observaciones se deben anotar aspectos tales como: la condición de la fuente muestreada, fecha

ZONA \_\_\_\_\_

ESTADO \_\_\_\_\_ APROVECHAMIENTO No. \_\_\_\_\_  
MUNICIPIO \_\_\_\_\_ FUENTE \_\_\_\_\_  
POBLACIÓN \_\_\_\_\_ PROFUNDIDAD \_\_\_\_\_  
PREDIO \_\_\_\_\_ NIVEL DEL AGUA \_\_\_\_\_ m  
PROFUNDIDAD DE TOMA EN LA MUESTRA \_\_\_\_\_ m  
PROCEDIMIENTO EMPLEADO \_\_\_\_\_  
NOMBRE DEL MUESTREADOR \_\_\_\_\_  
CONDUCTIVIDAD \_\_\_\_\_ micromhos/cm  
TEMPERATURA \_\_\_\_\_ °C pH \_\_\_\_\_

TURBIA SI\_\_ NO\_\_ COLOR SI\_\_ NO\_\_  
OLOR SI\_\_ NO\_\_ SABOR SI\_\_ NO\_\_

OBSERVACIONES \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

FIGURA 5.15 FORMATO PARA LA TOMA DE MUESTRAS

e intensidad de la última lluvia, color y olor del agua, etc.

Los resultados del muestreo de los diferentes aprovechamientos, deberán ser interpretados en base al conocimiento disponible de las características del aprovechamiento. Si el pozo está contruido para admitir agua de los materiales permeables penetrados bajo el nivel freático, el agua de éste representará solamente un promedio grueso de la calidad de la misma, disponible a través del espesor de penetración; luego, un estudio hidrogeoquímico detallado, requiere el conocimiento de las características constructivas de los aprovechamientos existentes.

Debido a que las zonas de agua generalmente se encuentran en movimiento, las muestras colectadas en un punto fijo se encuentran sujetas a diferencias, resultando que aguas de composición diferente circulan por un mismo punto muestreado; puesto que el movimiento de las aguas subterráneas es relativamente lento, los cambios también lo serán y en consecuencia pueden ser generalmente seguidos satisfactoriamente con programas de muestreo estacionales o anuales.

#### V.8D Formas de expresión de los análisis químicos.

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

- p.p.m. partes por millón
- mg/l miligramos por litro
- meq/l miliequivalentes por litro
- e.p.m. equivalentes por millón

La primera de las unidades relaciona peso con peso. Una parte por millón equivale a una parte en peso de materia disuelta en un millón de partes en peso de agua; esta unidad es independiente del sistema de medidas empleado.

La segunda forma de expresión relaciona peso con volumen y es la unidad que generalmente se utiliza en el laboratorio, ya que las muestras de agua se miden en fracción de litro y los componentes químicos en miligramos; para la mayoría de las aguas subterráneas, ambas formas de expresión son numéricamente iguales si la concentración de sólidos disueltos es baja y el peso específico del agua es casi uno, lo cual para usos prácticos es cierto.

$$\text{Partes por millón} = \frac{\text{miligramos por litro}}{\text{peso específico del agua}}$$

$$\text{p.p.m.} = \text{mg/l}$$

Para explicar las dos últimas unidades es necesario introducir el concepto de peso equivalente.

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

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

Los estudios físicoquímicos han mostrado que la capacidad de reacción de un elemento en solución no depende del contenido en peso de sales disueltas, sino más bien del número de equivalentes que entran en reacción. La unidad de concentración es el equivalente por litro, el cual se define como el número de equivalentes contenidos en el peso del elemento, expresado en gramos, disueltos en un litro de agua. Dado que la mayoría de las aguas subterráneas poseen un contenido total de sólidos disueltos considerablemente inferior al uno por ciento total del peso total de la muestra, en la práctica, para evitar los decimales se utilizan las milésimas, es decir, el miliequivalente por litro (meq/l), el cual se obtiene dividiendo el peso del elemento en solución, expresado en mg/l, por su equivalente químico.

$$\text{meq} = \frac{\text{peso del elemento en solución (mg/l)}}{\text{peso equivalente}}$$

Si se parte en p.p.m., la unidad se denomina equivalente por millón (epm) obteniéndose al dividir la concentración de un ión en ppm, por su peso equivalente.

$$\text{epm} = \frac{\text{concentración del ión considerado en ppm}}{\text{peso equivalente}}$$

Los números así obtenidos se denominan CANTIDADES DE REACCION, designados según Stabler con la letra r.

Puesto que el peso equivalente de un catión se combina en el peso equivalente de un anión, la suma de las cantidades de reacción de los cationes debe ser igual a la de los aniones; esto se aprovecha para comprobar la exactitud y exhaustividad de los análisis químicos.

## C A P I T U L O V I

### M E T O D O S D E P E R F O R A C I O N

La manera más segura de conocer el tipo de formaciones que se encuentran por debajo de la superficie terrestre, es perforando a través de ellas, obteniendo muestras durante la perforación y elaborando un registro del corte.

Los registros de los pozos consisten en indicar las características propias de los diferentes estratos en función de la profundidad. Hay diferentes formas de realizar el registro de un pozo, la más común es la descripción del perforista acerca del carácter geológico de cada estrato, la profundidad a la que se produce un cambio en el tipo de estratos que se vayan atravesando y la profundidad a que se encuentre el agua.

Las muestras de los materiales obtenidos durante la perforación representan en la mayoría de los casos, la mejor fuente de información tanto en el aspecto geológico como en el hidrológico. El fin principal en la perforación de pozos de exploración es obtener muestras que revelen el tipo, profundidad y espesor de los estratos que formen el subsuelo de las zonas por estudiar.

Las perforaciones de exploración se realizan para satisfacer dos objetivos: pueden ser parte del estudio geohidrológico de una área, o bien pueden ser preliminares al diseño y construcción de uno o más pozos en un lugar en particular. En relación a una área de estudio los pozos de exploración

se hacen para verificar o contemplar la información obtenida por otras fuentes y realizar la prospección de un lugar en particular para obtener datos específicamente necesarios para el diseño de pozos, lo cual requiere una atención algo más detallada en el análisis de las muestras de los materiales que constituyen los acuíferos, siendo necesario también una mayor precisión en el registro del pozo.

Los méritos relativos a los diferentes tipos de perforación, varían de manera considerable, ya que cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas, dependiendo éstas de las condiciones geológicas locales.

Para la selección del método de perforación en pozos intervienen diversos factores entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

- a) Simplicidad y disponibilidad del equipo, así como confiabilidad y experiencia en su manejo.
- b) Facilidad y seguridad en la perforación y durante el terminado del pozo.
- c) Velocidad de la construcción y de la puesta en operación del pozo.
- d) Costos (de perforación mano de obra, equipo).
- e) Tipo de material en el cual se va a perforar.
- f) Profundidad estimada del acuífero, así como su rendimiento.



- g) Diámetro de la perforación.
- h) Número de pozos a perforar en esa misma zona.
- i) Terminado del pozo.
- j) Prevención de contaminar otros acuíferos y del área circundante al pozo.

En la actualidad existen diversos métodos para la perforación de pozos, sin embargo, dos son los que han alcanzado uso mayor. Dichos métodos son: el del sistema de percusión o pulseta y el de sistema rotatorio. En algunos equipos se combinan ambos sistemas.

#### VI.1 Método de percusión o pulseta

La perforación a percusión es de los procedimientos más antiguos y se sigue empleando hoy en día, sobre todo en la perforación de pozos para extracción de agua. Debido a que para extraer el material conforme se avanza en la perforación es necesario detenerla, sacar el barreno e introducir un cucharón, la profundidad de perforación con este método está limitada en la práctica. Otro limitante de este método es que, en materiales no consolidados, es necesario ir ademando el pozo conforme se va profundizando, lo que implica también detener la perforación.

Existen en el mercado una gran variedad de barrenos, brocas, percusores, etc., en función del equipo de perforación y del tipo de roca en que se va a perforar.

En lo que respecta a los barrenos, uno de los factores más importantes es su peso. Para pozos de diámetro pequeño (menos de 25 cm) los pesos comunes están entre 100 y 500 kg, mientras que para pozos de gran diámetro llegan a pesar 1200 kg.

La longitud del barreno y barretón es de importancia ya que ayuda al mantenimiento rectilíneo y vertical de la perforación. La longitud del barretón varía entre 3 y 5 m y su peso entre 400 y 1000 kg.

En la selección del diámetro del cable deben considerarse, además del peso del barreno y del barretón, los esfuerzos de tensión (al subir y bajar la herramienta), la fricción (con el agua, lodo, paredes del pozo y mecanismos del equipo de perforación) y esfuerzos de fatiga (por el repetido enrollamiento y desenrollamiento). Los diámetros de cable más usados son los de 5/8 a 3/4 de pulgada, pero existe cable de más de una pulgada cuando se usa equipo demasiado pesado.

Para mejorar la eficiencia de la perforación con el método de percusión deben cuidarse las cadencias de perforación y de extracción del material fragmentado. Es obvia la ayuda que en este sentido da un perforista experimentado.

## VI.2 Método rotatorio

La perforación a rotación puede emplearse para perforar en suelos de distintas texturas y durezas, desde muy blandos como pizarras arcillosas, calizas blandas hasta muy duras

y abrasivas, como areniscas, cuarcitas y basaltos. Permite además perforar a grandes profundidades en forma eficiente.

La herramienta de corte está formada con varios elementos cónicos que al girar van fragmentando el material del fondo y paredes del pozo. Según sea el número de elementos se les conoce como bicónicos, tricónicos, etc., siendo los más usados, los tricónicos.

Existen en el mercado una gran variedad de tipos de triconos; esto facilita la selección de la herramienta de corte en función del diámetro de perforación y del tipo de suelo.

En el método rotatorio con circulación directa, el chorro del fluido de perforación sale por la herramienta de corte a alta velocidad, ayudando a la acción cortante de ésta; el lodo sube, llevando los fragmentos del material recién cortado por el anular, entre el tubo y las paredes de la formación. Aún cuando al subir el fluido de perforación no viaja a velocidades muy altas, puede erosionar las paredes de la formación debido a que transporta los fragmentos del recorte. Esto puede ser una desventaja cuando el material de las paredes de la formación sea blando o inestable. En el método de perforación con circulación inversa, el fluido de perforación (limpio) baja por el anular a relativamente baja velocidad y sube por el tubo de la herramienta de corte a una velocidad bastante alta (3 a 4 m/s), por lo que se tiene una capacidad de arrastre mayor; esto tiene la ventaja de que pueden arrastrarse pedazos grandes del recorte fácilmente (con la limitancia

del diámetro interior del tubo). En este caso, al descender el fluido de perforación a baja velocidad y limpio, se erosionan menos las paredes; por ello es posible usar lodos de baja densidad o incluso agua con lo que disminuye el riesgo de impermeabilizar o contaminar acuíferos suprayacentes que no es necesario explotar.

Dependiendo de la naturaleza del terreno se pueden dar algunos indicadores como son:

a) En formaciones sedimentarias el método rotatorio es preferible al de percusión; sin embargo, es más fácil obtener buenas muestras de las formaciones atravesadas por el método de percusión que por el rotatorio. Cuando se desea obtener muestras de formaciones extremadamente duras mediante el método rotatorio, se emplean trépanos de diamante, los cuales extraen un núcleo cilíndrico de la formación, que por lo general no presenta alteraciones.

b) El método de percusión se prefiere en los casos en que se perfora a través de rocas cavernosas con formaciones altamente permeables; la razón es que si se empleara el método rotatorio, el fluido usado puede perderse en éste tipo de formaciones. En algunos casos puede emplearse el método rotatorio si al fluido de perforación se le agregan arcillas o materiales fibrosos especiales.

c) En los casos donde existen conglomerados o depósitos aluviales, es preferible el método de percusión, aunque casi siempre habrá dificultades con cualquier método elegido.

d) En rocas sedimentarias duras, tales como calizas, dolomitas y areniscas cementadas, el método rotatorio no es recomendable durante los primeros metros perforados, ya que el peso de la herramienta generalmente no es suficiente para el trabajo a efectuar. El método de percusión, sin embargo, tiene la misma velocidad de perforación a cualquier profundidad en este tipo de materiales. Lo mismo puede decirse en el caso de rocas metamórficas e ígneas.

Se puede llegar a la conclusión que el método rotatorio es excelente para perforaciones en roca, pero debido al uso de fluidos durante la perforación y la gran velocidad de rotación, altera evidencias de los tipos de suelo.

El método de percusión no obtiene buenos resultados en terrenos del tipo predominantemente arenosos o arcillosos, pero en cambio, rinde bien en los que son mezclas de ambos.

Los depósitos de gravas se pueden perforar generalmente bastante bien con métodos de percusión, mientras que a una perforación rotatoria la entorpecen o incluso detienen su avance. Igualmente, la perforación por percusión avanza mejor en boleos que la rotatoria, sobre todo si están sueltos y tienden a rodar en el fondo.

#### VI.2A Perforaciones por el sistema rotatorio.

La máquina rotatoria es un equipo generalmente transportable que consta de una plataforma de perfiles de acero, sobre la cual se ajusta una torre o mástil, generalmente construída en dos secciones, la cual, en su extremo superior

tiene instaladas varias poleas, por medio de las cuales y mediante el empleo de cables, se realizan las maniobras de izado de herramientas y tuberías de perforación.

En la base de la torre se encuentra instalada la llamada mesa rotatoria, la cual es concéntrica al eje del mástil y cuya finalidad es de transmitir un movimiento de rotación a la tubería de perforación; este dado es de sección exagonal o rectangular y el tramo superior de la tubería de perforación, que recibe el nombre de KELLY, se ajusta a él, pudiendo desplegarse longitudinalmente.

El extremo superior del kelly se une a una pieza especial de junta giratoria de tubería denominada comúnmente SWIVEL, el cual se ajusta a la manguera de lodos que proviene de la bomba de circulación de fluidos. El lodo pasa así a través del kelly, que es hueco, y sucesivamente a través de la tubería de perforación y del trépano, retornando a la parte superior de la perforación por el espacio que queda entre la tubería y la pared del pozo.

#### VI.2B Sistema de circulación de lodos

La bomba generalmente empleada es reciprocante, duplex, con cilindros de camisas removibles. El fluido de perforación va desde la perforación hasta un tanque de sedimentación, encauzado mediante una zanja en la que se coloca una criba que detiene los fragmentos cortados. En el tanque de sedimentación el fluido se detiene por un tiempo corto para que se sedimenten las arenas y otros materiales granulares, pasando posteriormente al tanque de succión, en donde es nuevamente absorbido. fig. 6.1

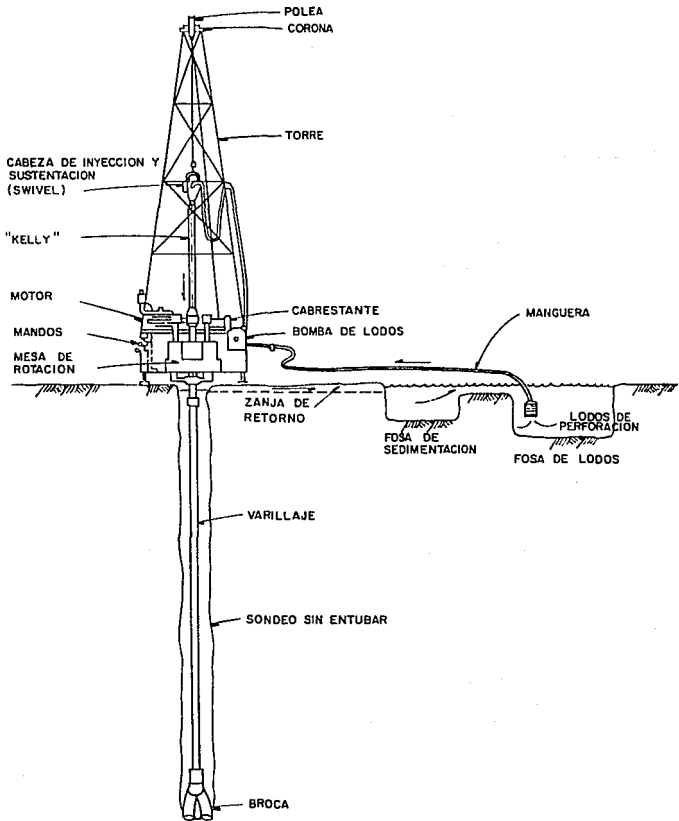


FIGURA 6.1 COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO DE PERFORACION POR ROTACION

El extremo de succión de la bomba se introduce en el tanque de succión, cuidando que el chupón o pichancha no quede muy cerca del fondo. El fluido de perforación usado en las máquinas rotatorias es por lo menos 10 veces mayor en volumen que el usado en máquinas operadas por el sistema de percusión. El fluido puede consistir en una mezcla de arcilla y agua. La arcilla puede ser natural o combinación natural y comercial; la comercial es generalmente una bentonita y cada 50 kilos de ella pueden servir para hacer hasta 1000 litros de fluido de perforación. Si sólo se emplea arcilla natural, probablemente se obtenga la cuarta parte del fluido.

Generalmente existe una ligera pérdida de fluido de perforación; cuando ésta se vuelve excesiva (por ejemplo 10 litros por minuto en un pozo de 5"), debe anotarse cuidadosamente la profundidad y extraer muestras. Si hay un incremento del fluido de circulación, es probable que se haya encontrado una formación conteniendo agua artesiana con presión hidrostática mayor que la de la columna de lodos del pozo.

Se pueden mencionar algunas ventajas y desventajas que tienen los equipos de circulación directa, como, son las siguientes:

- Ventajas

a) Actualmente, las técnicas más avanzadas en la perforación de pozos se aplica en este sistema, permitiendo que se logren las mejores velocidades de perforación y por su popularidad, existen en el mercado una gran variedad de



diseño de máquinas y herramientas que permiten hacer una buena selección del equipo para cada proyecto.

b) Las propiedades tixotrópicas de los fluidos químicos que circulan durante la perforación forman un enjarre que ayuda a mantener el equilibrio las paredes del pozo y con una hidráulica de circulación apropiada, mantiene limpio el pozo previniendo en muchos casos la invasión de agentes extraños a las zonas saturadas con agua, además de que dicha limpieza en el pozo ayuda a mantener el efecto cortante en las barrenas.

c) El sistema permite en la mayoría de los proyectos de pozos, programar tentativamente el tiempo requerido para la obra ya que los ejecutores pueden variar convenientemente las condiciones que influyen en la velocidad de penetración como son:

1.- El tipo de barrena tricónica en lo que se refiere a longitud de diente y área del balero.

2.- Potencia hidráulica aplicada a las toberas para lograr la máxima velocidad en la salida y en el espacio anular.

3.- La calidad de los lodos de perforación que pueden ser mejorados a base de reactivos químicos para matener en buenas condiciones la gelatinidad y viscosidad.

4.- La cantidad y medida de tubería de perforación y lastrarbarrenas para aplicar rotación y peso sobre la barrena, pueden ser variadas para obtener eficiencias razonables.

d) Las sartas de perforación a base de tuberías, lastrabarreras y estabilizadores, pueden proyectarse para obtener una rigidez que permita mantener el pozo dentro de su verticalidad, con lo cual se logra que los intervalos que se perforan para servir como cámaras de bombeo, se construyan casi verticales, evitando con esto los problemas mecánicos que se presentan en los equipos de bombeo cuando los pozos tienen quiebres que obligan a las tuberías y flechas a trabajar con flexiones que producen desgastes excesivos.

- Desventajas

a) Requieren un suministro continuo de agua y por este motivo su operación es problemática donde no existen fuentes de abastecimiento.

b) Cuando se perforan zonas muy permeables y de baja presión, se producen grandes pérdidas de circulación de lodos, el cual puede afectar las condiciones hidrológicas de los acuíferos, volviéndose más problemática esta situación cuando no es posible continuar la perforación a base de circulación con agua.

c) Su costo de operación es alto porque requiere un mayor número de personal especializado; su consumo de potencia es alto y las herramientas son de alto costo, de modo que puede resultar incosteable cuando no se aprovecha con alta eficiencia.

d) El costo inicial es alto cuando se adquiere el equipo

completo con todas las herramientas y accesorios de ataque y control.

e) La transportación del equipo requiere en algunos casos de vehículos y grúas especiales, que en lugares de difícil acceso no son fáciles de trasladar.

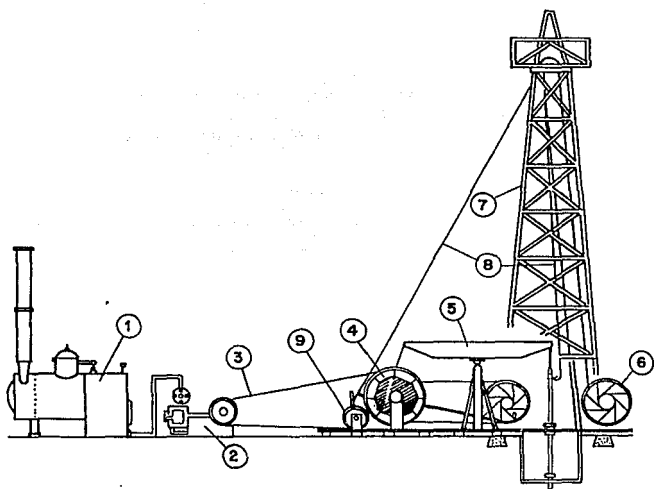
#### VI.2C Ejecución de perforaciones por el sistema de percusión.

La máquina perforadora de percusión es un equipo portátil que usa el principio de balancín exclusivamente. La unidad consta de un motor de gasolina o diesel, una estructura para perforar, balancín con accionamiento de cable, ventilador para faenas de forja, línea de perforación, línea de cuchareo y la estructura de la torre o mástil soldada al arco. La unidad, una vez montada, se puede operar sobre traviesas (puesto de través), o ésta puede ser montada sobre un camión a fin de que sea fácilmente transferible (fig. 6.2).

El avance de la perforación con máquina de percusión depende sobre todo de cuatro factores principales:

- 1) El diámetro del pozo por perforar
- 2) El peso de la sarta de herramientas
- 3) Longitud de la carrera o caída de las herramientas
- 4) Velocidad o número de golpes por minuto con que las herramientas golpean el fondo del pozo.

Si se examinan estos cuatro factores y se consideran sus características básicas, se notará que no solo el tipo de



- ① - FUENTE DE POTENCIA
- ② - MAQUINA MOTRIZ
- ③ - TRANSMISION
- ④ - VOLANTE
- ⑤ - SISTEMAS DE BALANCIN
- ⑥ - TAMBOR DEL CABLE
- ⑦ - TORRE
- ⑧ - CABLE DE PERFORACION
- ⑨ - TAMBOR AUXILIAR

FIGURA 6.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO DE PERFORACION POR PERCUSION

formaciones en el subsuelo determina la velocidad a la que el pozo puede ser perforado. El equipo en sí, perfora las rocas con herramientas martilladoras y su efecto cortante aumenta con el número de golpes que se aplican, así como la intensidad del impacto que es variable. La potencia se aprovecha en un sistema de carretes y polipastos para introducir herramientas, tuberías y demás implementos hasta el fondo del pozo por medio del cables de diferentes usos; en este sistema de perforación no se hace necesaria la circulación de fluidos, lo que hace que las potencias requeridas sean relativamente bajas y ventajosas en algunos casos. Por su simplicidad de fácil manejo aún se siguen utilizando con bastante frecuencia.

A continuación se presentan algunas desventajas y ventajas de los equipos de percusión:

- Ventajas

a) Son equipos fácilmente transportables.

b) El costo de operación es económico, debido a que se requieren cuadrillas de personal reducido así como por su baja potencia consumida.

c) Por su bajo consumo de agua, lo hace superior en emplazamientos en donde se carece de fuentes de abastecimiento.

d) La porosidad y permeabilidad originales de los acuíferos se conservan mejor debido a la reducida cantidad de materiales coloidales y químicos necesarios para el acarreo

de los detritos, durante las maniobras de limpieza en los avances de perforación.

- Desventajas

a) Su falta de rigidez en la sarta de perforación, hace incontrolable la verticalidad del pozo, presentándose siempre una tendencia a la desviación por influencia de los echados de las formaciones de las rocas.

b) El cable que opera las herramientas perforadas, es relativamente elástico, lo que reduce sus efectos de golpeteo y por ende el efecto cortante de las barrenas a medida que avanza la profundidad del pozo.

c) Cuando se rompe el equilibrio de las rocas perforadas, el ángulo de reposo en las paredes del pozo se dificulta algunas veces, provocando derrumbes que retrasan los avances de la obra y en ocasiones, la hacen imposible por la falta del ademe preliminar que dán los enjarres de los lodos de perforación.

d) Comparativamente, es un sistema de perforación económico pero lento, teniendo grandes limitaciones en cuanto a profundidades y diámetros.

### VI.3 ADEME

Se conoce como ademe a la tubería que se coloca para revestir definitivamente al pozo. Se divide en ademe ciego

y ademe ranurado.

#### VI.3A Ademe Ciego.

Las funciones fundamentales del ademe ciego son sostener las paredes de la formación perforada en toda su profundidad y funcionar como un conducto hidráulico eficiente comunicando el acuífero con la superficie. También sirve para clausurar otros acuíferos que no se desean explotar en el mismo pozo o para evitar que el acuífero de mala calidad contaminen al que si se desea explotar.

Algunas veces se usa un ademe provisional durante la construcción cuyo objetivo es sostener las formaciones durante la construcción para evitar desprendimientos de material que puedan bloquear la herramienta de perforación.

En la mayoría de los casos para extracción de agua se utilizan ademes construidos con tubos metálicos aunque se usan en menor escala tubos de fibrocemento, fibra de vidrio, PVC, etc. En general se usan tubos de acero y su longitud está entre 6 y 9 m. Un tubo se une con el siguiente con un niple roscado o con soldadura a tope. Debe evitarse el empleo de tuberías de distinto metal pues ello fomenta la corrosión. Cuando se tengan problemas de erosión y/o corrosión debido al tipo de agua bombeada, deberá recurrirse a aleaciones más resistentes y protecciones catódicas.

Independientemente de la elección que se haga del material de la tubería en función de la agresividad del agua, es preciso considerar el diámetro más adecuado y su espesor.

El diámetro mínimo para un ademe ciego es función del tipo de ademe ranurado elegido y del diámetro de la bomba (que depende del caudal y de las características de la bomba). El Instituto Americano del Petróleo (API) recomienda los diámetros mínimos como función de la capacidad de bombeo, dados en la siguiente tabla:

Diámetro de la perforación, en cm.	Diámetro del ademe, en cm.	Capacidad de bombeo, en l/s
61.0	50.8	> 100
50.8	40.6	hasta 100
44.5	34.0	" 60
31.2	24.5	" 30
21.6	17.8	" 15
15.9	12.7	" 5
10.8	7.7	< 5

El espesor de la pared del ademe depende de los esfuerzos a que la tubería estará sometida. Los esfuerzos más desfavorables son los debidos al empuje del terreno y a las cargas hidrostáticas por diferencias de nivel del agua entre el interior y el exterior del pozo. Para calcular el espesor mínimo deben seguirse los procedimientos de diseño de conducciones a presión y de tuberías considerando la carga de ruptura por aplastamiento.

Es práctica común construir ademes con diámetros decrecientes con la profundidad (telescopicos). Esto disminuye el costo tanto de la perforación del pozo como del ademe mismo. El traslape de las tuberías debe ser estanco, principalmente cuando se hayan perforado formaciones permeables. El cierre entre dos tuberías de

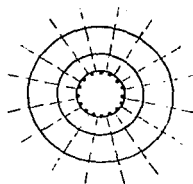
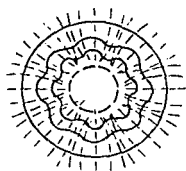


diámetros diferentes, requiere una longitud de traslape de la cementación de 2 a 3 m y un espacio entre ambas tuberías que permita introducir entre ellas la inyección del cementante.

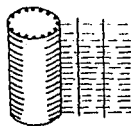
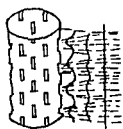
#### VI.3B Ademe Ranurado.

Es la parte del pozo por donde penetra el agua del acuífero a la tubería para ser bombeada a la superficie. El ademe ranurado debe tener las siguientes características:

- a) El tamaño de las aberturas se diseña para evitar la obstrucción por arena y grava (ya sea del filtro o del acuífero).
- b) Proporcionar la máxima área hidráulica, sin sacrificar la resistencia estructural del material del ademe.
- c) Distribución uniforme de las ranuras para que el flujo de agua hacia el pozo sea fácil y permitir un desarrollo adecuado. fig. 6.3
- d) Construcción de un sólo metal, resistente a la corrosión y a los ácidos usados para desincrustar el pozo.
- e) Forma adecuada, que permita pérdidas de carga pequeña y no provoque incrustaciones.
- f) Resistencia elevada al colapso y a la compresión.
- g) Ser razonablemente económico.



PLANTA



PERSPECTIVA

FIGURA 6.3 ESQUEMAS DE ADEMES RANURADOS

En general, se escoge el tamaño de las aberturas del ademe ranurado para permitir que durante el desarrollo del pozo queden retenidos del 30 al 60 por ciento de los granos de un pozo sin filtro, más entre mayor es su uniformidad para evitar asentamientos. En la actualidad se fabrican ademes ranurados con distintas aberturas para adaptarse a la granulometría del acuífero.

Los tipos más comunes de ademe ranurado son los de ranura continua, de persiana, de puentecillos, con tubo base y tubo perforado.

Los ademes de ranura continua se construyen con alambre en espiral enrollado alrededor de un armazón de varillas longitudinales. Es de los ademes con mayor área hidráulica posible y con condiciones de flujo uniforme. Es también bastante resistente a los esfuerzos a que queda sometida durante y después de la instalación.

Los parámetros importantes en el diseño del ademe ranurado son, la longitud, el tamaño y tipo de abertura de ranura, el metal así como el diámetro del ademe.

La longitud óptima depende del espesor y estratificación del acuífero y del posible descenso dinámico del nivel del agua. Debe tener la mayor longitud posible, pero evitando que el nivel dinámico deje en seco alguna zona.

La selección del tamaño de la ranura del ademe depende de la distribución granulométrica del material del acuífero; cuando su coeficiente de uniformidad ( $C_u = D_{60}/D_{10}$ ) es mayor que 6 (material no uniforme) y el material que superyace

al acuífero es firme, el tamaño de ranura se escoge para retener el 30 por ciento del material del acuífero. Con el mismo coeficiente de uniformidad pero el material suprayacente blando, el tamaño de la ranura se diseña para retener el 60 por ciento. Cuando se coloca filtro de grava la ranura se diseña para retener el 90 por ciento de partículas del filtro.

La selección del metal adecuado para el ademe ranurado depende, como en el ademe ciego, de la composición química del agua, la presencia de limos bacterianos y la resistencia estructural de la rejilla.

El diámetro del ademe ranurado se determina teniendo en cuenta el área abierta necesaria para dejar pasar el gasto de diseño sin provocar una velocidad de admisión excesiva. En general el diámetro se fija después de seleccionar la longitud de la zona ranurada así como el área hidráulica.

La velocidad de admisión es un factor crítico en la operación eficiente de un pozo; en general se diseña el diámetro del ademe en forma tal que la velocidad de admisión por las ranuras sea igual o inferior a 3 cm/s.

#### VI.4 Cementación del Pozo.

El principal objetivo de la cementación es la unión del ademe ciego con el material que forma la pared del pozo.

Con ello se consigue evitar que las aguas superficiales contaminen el acuífero, evitar la comunicación del acuífero

en explotación con otros que no se quieren explotar y aumentar la resistencia mecánica del ademe. También sirve la cementación para formar un tapón o sello en el fondo del pozo, y para corregir desviaciones en la tubería.

Los procedimientos más usuales de cementación son:

a) Introducción de la tubería de revestimiento con el pozo lleno de la suspensión de cemento.

Se llena el pozo con la mezcla, ya sea desde la boca del pozo por gravedad o inyectando con una tubería; si el pozo está lleno de lodo o agua, el cemento los desplaza. A continuación se introduce la tubería del ademe con el fondo tapado desplazando de esta el cemento por el anular. El tapón se rompe una vez que el cementante esté seco. Este procedimiento se recomienda para pozos de menos de 50m.

b) Inyección a presión por el interior de la tubería. Se introduce la tubería del ademe en el pozo lleno de agua o lodos hasta dejarlo a unos 30 o 40 cm del fondo. Se fija una tapa al tubo en la cual se tiene un dispositivo para inyectar el cementante. Con una bomba (que puede ser la misma usada para la circulación de lodos) se inyecta el cementante a través de la tapa desplazando de esta forma agua y lodos contenidos en la tubería, haciéndolos subir por el anular entre el tubo y las paredes de la formación. Se continúa inyectando el cementante hasta completar el volumen estimado del anular y después se inyecta agua y lodo a presión para hacer subir al cementado hasta su lugar. Se conserva la presión hasta que el cemento haya endurecido y se retira la tapa del tubo para continuar la perforación.

c) Inyección a presión por el interior de la tubería, con tapón perdido. Este método es muy semejante al anterior sólo que ahora se usan dos tapones. Se introduce la tubería como antes y primero se coloca un tapón de material fácilmente perforable encima de los lodos, y luego, se coloca la tapa fija en la parte superior de la tubería. El cementante inyectado desplaza al tapón que estaba sobre los lodos, hasta que dicho tapón llega hasta el fondo del pozo donde se deposita. Para continuar la perforación debe romperse el tapón en el fondo del pozo por lo que éste debe ser un material fácilmente perforable.

d) Inyección por el espacio anular. Se inyecta la suspensión de cemento por el anular entre las paredes del pozo y la tubería del ademe. En este caso los lodos suben por dentro de la tubería. El diámetro de las tuberías de inyección es menor de 5 cm por lo que este procedimiento no puede usarse cuando el anular es muy pequeño.

## VI.5 Selección de equipo

En la selección de un equipo no solamente tiene que pensarse en el equipo básico sino que debe analizarse todos los elementos complementarios que lo conforman tales como tubería de perforación, lastrabarrenas, llaves de apriete, etc. con el fin que todo el conjunto sea congruente para los programas de perforación y en sí de la operación en general.

Los principales conceptos que deben analizarse para tomar una determinación de designar el equipo adecuado serán :

### 1.- Aspecto de programa de perforación.

Este es uno de los aspectos que en la mayoría de los casos tanto el sector público como el privado no se ha analizado a fondo provocando muchas veces limitaciones de los equipos adquiridos, y con esto no poder abarcar todos los programas deseados.

Por lo tanto se tendrá que hacer, un estudio de los programas de perforación llevados principalmente por las Dependencias Federales en función de las profundidades y diámetros de perforación ya que estos dos factores podran por sí solos eliminar un sin número de equipos que actualmente se encuentra en el país.

### 2.- Aspectos humanos, de servicio y refaccionamiento.

En este punto el aspecto humano es tan importante como el aspecto de programa de perforación , ya que el nivel de preparción y educativo es generalmente bajo a la vez que no existen programas de capacitación o preparación anterior

para la operación de equipos, es por ello que es tan importante conocer este aspecto pues es demasiado arriesgado (desde el punto de vista económico) dejar en manos de personal impreparado un equipo que si lo consideramos nuevo tendría un costo demasiado alto.

Lo anterior tiene como objetivo tener un cuidado mayor en la selección del equipo en lo referente a su mayor o menor sofisticación.

Servicios.- Uno de los principales problemas que se han tenido en el país con los equipos de perforación es el que no se producen en México, y generalmente ha sido un mal tanto en la iniciativa privada como en el gobierno que se hayan adquirido equipos por oportunidad en esos momentos y normalmente las compañías representantes venden los equipos olvidándose del futuro servicio.

El análisis adecuado de cada uno de los componentes básicos en este punto y conociendo los medios con que se cuenta en el país para un buen servicio de cada uno de los elementos sera una base de gran peso para la decisión final.

Refaccionamiento.- Como el punto anterior es de vital importancia hacer un análisis exhaustivo de todos los elementos del equipo básico ya que en ocasiones el costo por equipo parado por una insignificante refacción es de grandes dimensiones en comparación con el costo de la refacción y más aún cuando no existe la facilidad de la importación, por ello entre menos componentes integrantes menor será el problema.



## VI.6 Análisis del equipo complementario.

a) Equipo de bombeo.- En este punto el criterio para decidir ya sea para sistemas de perforación con lodo o bien usando aire como fluido de perforación será igual en ambos casos dependiendo del programa de perforación ya que será la base para determinar capacidades de la bomba de lodos o del compresor para que en la operación se puede resolver todos los problemas que se presentan.

b) Sarta de perforación.- En este análisis se tendrá ya conocimiento de los programas de perforación que se vayan a ejecutar y en función de ellos decidir el diámetro de la Sarta de perforación.

Consideraremos que el diámetro sea de 22" para entubar a 16" que generalmente se proyectan en las dependencias oficiales será conveniente la utilización de una tubería de perforación de 4 1/2" y lastrabarrenas (Drill Collars) de 7 3/4 " en número total que está en función de la capacidad del equipo.

A menor diámetro de perforación y profundidad se podrá combinar tubería de perforación de 3 1/2" o de 2 7/8 " con lastrabarrenas de 6" o 5" sin embargo siempre existirá una limitación para cubrir otros programas.

c) Sistema de rotación.- Dentro del sistema de rotación generalmente se tienen dos formas de transmitir la rotación: por medio de mesa rotaria o mediante cabeza rotaria. En

muchos casos se tiene que analizar la capacidad del par de rotación para asumir los esfuerzos que se transmiten a través de la sarta de perforación y los diámetros de los agujeros. Sin embargo un factor principal es que cualquier sistema que se analice siempre se tratará de que en función de los programas de entubado el equipo permita la operación a través del mismo sin ninguna restricción ya que se dan casos que se tiene que retirar el equipo de perforación y utilizar un equipo adicional para poder llevar a cabo la colocación de la tubería lo que significa un costo adicional en los trabajos.

d) Llaves de apriete.- En este aspecto se buscará que cualquiera que sea el equipo cuente con un sistema hidráulico para operar las llaves de apriete de las diferentes marcas que hay en el mercado, pues es el sistema que proporciona la suficiente fuerza para aplicar el par para desconectar y conectar la sarta de perforación.

#### VI.6A Aspecto económico.

Una vez que se hayan analizado todos los puntos anteriores a detalle y aunque este aspecto es el principal, será más fácil para tomar una decisión tener la seguridad que se han estudiado todos los factores que se mencionaron para formar el cuadro comparativo de los equipos con el mismo en todos sus componentes.

Independientemente que se tendrá que analizar además del precio del equipo total, las facilidades de financiamiento, tiempos de entrega, refaccionamiento mínimo de un año para

partes de consumo normal así como los aspectos de contratación que se logren obtener.

En forma general se han analizado los aspectos principales para decidir la selección de un equipo para perforación de pozos de agua que pueden ser aplicables para equipo nuevo o en operación y que el hacer un buen análisis llevará por lo tanto a la obtención de mejores resultados y la seguridad que cualquier proyecto quede terminado y no dejado a medio camino con los problemas que ello representa para un programa general.

#### VI.7 Estimulación de Pozos.

El término estimulación fué definido como el tratamiento mecánico, químico, físico u otro medio cuyo propósito sea remover o reducir la resistencia al flujo del agua subterránea y son las técnicas necesarias para remover parcial o totalmente la resistencia del flujo de agua al pozo sin cambiar su característica constructiva.

Términos comparables en los pozos de agua son: desarrollo, redesarrollo, rehabilitación y reacondicionamiento.

Los trabajos de perforación por el método rotatorio en formaciones granulares siempre provocan taponamientos de los acuíferos por que utilizan lodo para sus fines.

Una de las propiedades del lodo de perforación es la pérdida de agua. Dependiendo de la permeabilidad en la formación y de las características propias del lodo; la pérdida de agua origina que alrededor del agujero se forme una película de lodo comunmente llamada "ejarre".

El trabajo en un buen desarrollo de pozos tendrá como objetivo la eliminación del enjarre dejado por el lodo de perforación.

El segundo objetivo es incrementar la permeabilidad del acuífero en las vecindades del agujero, eliminando las partículas de lodo y productos ajenos al pozo que hayan penetrado durante su perforación, el tercer objetivo, es lograr la formación de zonas de graduación de arenas, para dar el filtro adecuado y tener el pozo fluyendo a su capacidad específica.

Existe diferentes métodos para el desarrollo de pozos de agua de los cuales se mencionan a continuación:

a) Método Mecánico:

Agitación de las aguas del acuífero por medio de la acción de un pistón en el interior del ademe. Para esta operación se necesita utilizar un pistón debidamente ajustado al diámetro del ademe por empaques de hule o cuero, cuya finalidad es la de lograr una fuerte agitación.

La maniobra de agitación deberá iniciarse efectuando un movimiento recíproco al pistón, desde la parte inferior de los cedazos. Esta operación se repetirá levantando el pistón en intervalos de 10 metros hasta la parte superior del cedazo o nivel estático del agua, si ésta se encuentra abajo de la parte superior del ademe ranurado o cedazo.

**b) Método Hidráulico:**

Este método es también llamado sobre bombeo. El agua es bombeada a alta velocidad a través de una tubería colocada en el fondo del pozo y retornada por el ademe, su función es la de lograr una succión y hacer que el acuífero contribuya con el flujo de agua y así destapar los canales por arrastre de finos.

Una objeción para utilizar este procedimiento es el de elevar el nivel del agua hasta tener una carga hidrostática mayor que la que puede soportar el acuífero, como consecuencia, se inyectará a la formación toda la arcilla dispersa en el pozo, aunque se varíe la profundidad de la tubería continuará inyectando el agua, introduciéndose dentro del acuífero a mayor distancia de las arcillas.

Posteriormente a esto, será demasiado difícil lograr la limpieza del pozo. Otra objeción es la cantidad de agua necesaria para lograr el bombeo.

**c) Método Neumático:**

Este método consiste en inyectar aire a través de una tubería de pequeño diámetro, que está abajo del nivel estático del pozo y recuperar el aire mezclado con agua, por una tubería de mayor diámetro.

Este procedimiento es el más recomendado para el desarrollo de pozos de agua, porque en ningún momento existe el peligro de crear presiones hidrostáticas que inyectan finos a la

formación, sino que al contrario, al obtener abatimiento en el nivel del agua, el acuífero tiende a fluir, cooperando a su limpieza.

Además se logra el desarrollo de todo el acuífero variando las profundidades de las tuberías.

d) Método Físico-Químico:

Consiste básicamente en la adición de dispersantes de arcillas en el agua del lavado del pozo.

Las propiedades de los distintos productos agregados deberá ser la de dispersar el lodo de perforación y romper la gelatinosidad de éste. Rompiendo esta gelatinosidad, el lodo de perforación es fácilmente removido y bombeado a la superficie.

La mayoría de los productos dispersantes se mezclan con el agua del pozo y se agragan desde la superficie.

Existen productos dispersantes de arcillas que se mezclan con ácido clorhídrico, estos productos son más eficientes porque aunado a el trabajo del dispersante, el ácido por si mismo tiene propiedades que hacen más efectiva la limpieza del pozo.

La aplicación de hielo seco consiste en arrojar cargas de hielo seco sólido, el cual al sublimarse, aumenta grandemente su volumen logrando efectuar la limpieza parcial

del pozo. Este método está cayendo rápidamente en desuso por ser poco efectivo.

A continuación se describen los principales términos empleados en el aforo de pozos:

**Nivel Estático:** Es la distancia vertical medida en metros, desde el brocal hasta el nivel libre del agua cuando no está siendo bombeado; es decir, es el nivel en el cual se estabiliza el agua dentro del pozo.

**Nivel Dinámico o de Bombeo:** Es la distancia vertical medida en metros, desde el brocal del pozo hasta el nivel al cual se mantiene el agua cuando es bombeada a cualquier velocidad. Este nivel es variable y cambia de acuerdo al gasto que está siendo extrído.

**Abatimiento:** Es la diferencia en metros entre el nivel estático y nivel de bombeo; o sea la distancia vertical medida en metros que desciende el nivel estático de un pozo bajo la influencia del bombeo.

**Gasto o Caudal:** Es el volumen de agua que produce un pozo en la unidad de tiempo; se expresa en litros por segundo (l.p.s.).

**Nivel de Recuperación:** Son las distancias verticales medidas en metros desde el brocal del pozo, hasta los niveles libres del agua a partir del momento en que fué suspendido el bombeo y alcance su estabilización.

**Recuperación:** Es el lapso medido en la unidad de tiempo, que tarda en estabilizarse el Nivel de Recuperación.

**Capacidad Específica:** Es la relación que existe entre la producción del pozo, medida en litros por segundo y su correspondiente abatimiento por metro (l.p.s./m.).



## C A P I T U L O VII

### R E C A R G A A R T I F I C I A L

#### VII.1 Métodos de recarga

Existen varios métodos de recarga de aguas residuales tratadas al acuífero.

**Percolación:** es un relleno sanitario, se define generalmente como la cantidad de agua que excede la capacidad de un campo del residuo.

La decisión en cuanto al método de recarga a ser utilizado, estará regida por las suposiciones que se detallan a continuación:

a) La recarga se realizará a través de áreas de infiltración, por encima de un acuífero freático o semiconfinado.

b) La recarga estará basada en el efluente secundario o avanzado disponible, dentro de lo posible en un efluente proveniente de una planta de tratamiento en operación.

c) La cantidad del efluente para la recarga será suficiente como para permitir la realización de un programa predeterminado de ensayos y monitoreo en el campo. El volumen previsto para dichos fines es alrededor de unos 10,000 metros cúbicos por día, como promedio.

d) La única planta de tratamiento capaz de suministrar la cantidad de efluente necesario, es la planta de tratamiento Cerro de la Estrella.

Para la recarga se consideran básicamente dos métodos:

#### VII.2 Recarga del acuífero por realimentación

No hay una tecnología estándar para la aplicación de este tipo de recarga. Por lo tanto deberá determinarse, mediante investigaciones apropiadas, los procesos a ser aplicados para eliminar del efluente contaminantes convencionales tales como turbidez, sólidos en suspensión, materia orgánica: así como también compuestos específicos (metales pesados, sustancias tóxicas, contaminantes microbiológicos y otros). Por consiguiente, los sistemas más usuales de tratamiento de aguas negras incluyen procesos mecánicos-biológicos convencionales, seguidos por tratamiento avanzado para aguas residuales.

Como ejemplo típico de tratamiento avanzado de aguas residuales se ofrece a continuación una breve descripción de una de las plantas más importantes de este tipo, denominada "Water Factory 21" que se encuentra en Orange County, California, Estados Unidos.

En esta planta, el tratamiento avanzado del efluente prosigue el tratamiento usual de lodos activados convencionales e incluye los siguientes procesos:

- a) Clarificación con cal incluyendo recalcinación de lodo.
- b) Eliminación de amoníaco.

- c) Recarbonatación.
- d) Cloración hasta el punto crítico.
- e) Filtración en medios múltiples.
- f) Adsorción con carbón activado, incluyendo regeneración de carbón.
- g) Desmineralización por ósmosis inversa.
- h) Postcloración.

En la figura 7.1 se muestra el esquema de la planta de tratamiento Water Factory 21.

La eficiencia típica del proceso se evidencia en la eliminación de un 98 % de turbidez, 88 % de la demanda química de oxígeno (DQO), 70 % de detergentes, 98 % de fósforo, 80 % de nitrógeno y 100 % de coliformes y virus.

El método de recarga del acuífero por realimentación, tiene por objetivo llenar el acuífero de manera tal que el porcentaje de agua recargada al acuífero sea mantenido suficientemente bajo como para permitir la continuación de la extracción del agua del acuífero para uso general.

En este caso, el tratamiento al que serán sometidas las aguas residuales, previo a la recarga, deberá posibilitar la obtención de un efluente de calidad similar a la especificada en las normas de agua potable.

Este método ha sido aplicado principalmente en los Angeles y Orange Counties, California, Estados Unidos.

Por tanto, para poner en práctica la recarga artificial, se realizó un análisis de la infraestructura hidráulica

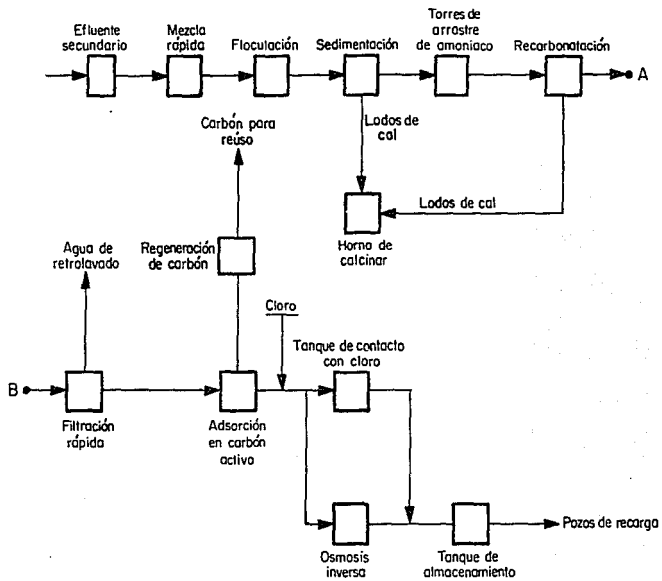


FIGURA 7.1 ESQUEMA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO  
WATER FACTORY 21

actual para seleccionar pozos caducos que pudieran utilizarse, por otra parte, un criterio fundamental para seleccionar el pozo, lo constituye las capacidades de producción de cada planta, así como su calidad.

Se localizarón dichos pozos, anotándose los que se encuentran cercanos tanto a las plantas de tratamiento, así como a las líneas actuales de conducción de aguas tratadas, tomando además en cuenta a los pozos que se encuentran relativamente aislados a fin de no seleccionar pozos junto a otros que esten actualmente en operación y prevenir una posible contaminación directa.

Con base a lo anterior, se seleccionaron los posibles pozos de utilizarse cuya relación y características se muestran a continuación. (en el caso del D.F.)

Planta	Pozo para inyección	Caudal (l.p.s.)	Distancia de la planta de tratamiento
Rosario	San Martín N° 2	60	1,200 m.
Bosques de las Lomas			
	L. Chapultepec N° 3	cancelado	1,250 m.
	L. Chapultepec N° 4	cancelado	1,500 m.
	L. Chapultepec N° 6	cancelado	1,250 m.
Chapultepec	Campos Eliseos	40	500 m.
	L. Chapultepec N° 2	cancelado	600 m.
	L. Chapultepec N° 7	cancelado	1,200 m.
Tlatelolco	Tlatelolco	20	4,000 m.
	Abasolo-Jardín	70	800 m.
Coyoacán	P - 1,872	cancelado	1,400 m.
	P - 2,081	cancelado	1,400 m.

San Juan de Aragón

P - 1,197	cancelado	sobre la línea
P - 2,210		" "
P - 1,207		" "

Cerro de la Estrella

Panteón civil N° 1	Parado	700 m.
Panteón civil N° 2	cancelado	400 m.
Panteón civil N° 3	cancelado	1,250 m.
P - 2,670	cancelado	800 m.
P - 6	Parado	sobre la línea
P - 5	Parado	1,500 m.
P - 4	Parado	1,800 m.
P - 3	Parado	3,600 m.
P - 2	Parado	4,200 m.

Ciudad Universitaria

Altillo Universidad	cancelado	1,400 m.
---------------------	-----------	----------

Ciudad Deportiva

P - 1,535	cancelado	1,000 m.
P - 174	cancelado	800 m.
P - 175	cancelado	700 m.

VII.3 Recarga del acuífero mediante el proceso de tratamiento del efluente por infiltración-percolación.

La alternativa de la recarga del acuífero mediante el proceso de tratamiento del efluente por infiltración-percolación, se considera para el caso de que el objetivo de la recarga del acuífero es el tratamiento de las aguas negras y su almacenamiento en el acuífero, teniendo las aguas renovadas un uso limitado.

Este método debe ser concebido de tal modo que durante el flujo a través del suelo, el efluente recargado no pueda moverse de la línea de pozos de recuperación que extraen del acuífero todo su volumen.

Este método ha sido experimentado y aplicado en Israel y Estados Unidos.

La descripción de las plantas de tratamiento y recarga de aguas residuales en la región de Dan, Israel y en Flushing Meadows, Arizona, Estados Unidos ilustran los resultados obtenidos mediante la aplicación del método de recarga de acuíferos con el proceso de tratamiento del efluente por infiltración-percolación.

En la fig 7.2 se muestra un esquema de la planta de tratamiento de aguas residuales en la región de Dan, que incluye la instalación para el tratamiento biológico y avanzado de aguas residuales y la recarga del efluente.

El tratamiento biológico se realiza en lagunas de oxidación con recirculación parcial del efluente. El tratamiento avanzado de aguas tratadas consiste en un proceso químico de depuración por medio de un tratamiento con pH elevado, eliminación de amoníaco y racarbonatación natural.

Las instalaciones principales de recarga deben incluir una estación de bombeo, una conducción del efluente y campos de recarga.

De acuerdo con resultados de ensayos preliminares de laboratorio y experimentos, se ha optado por un régimen

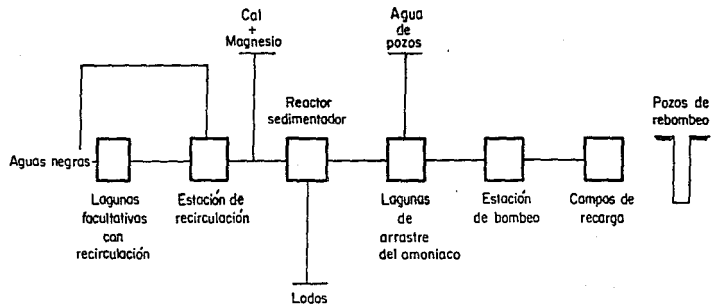


FIGURA 7.2 ESQUEMA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, DAN ISRAEL



de recarga intermitente para la operación de los campos de recarga.

El tipo seleccionado de recarga ha sido 1 día de inundación, seguida por 2 a 3 días de secado de los campos de recarga.

A fin de obtener el máximo posible de información sobre las tasas de infiltración y la calidad del efluente que se percola en la zona del suelo no saturada y la calidad del agua en el acuífero, se ha ideado un sistema adecuado de monitoreo que se implementará simultáneamente con el inicio de la operación de los campos de recarga.

El sistema de monitoreo se basa en el aforo de flujos, mediciones de nivel de agua en los campos de recarga y del acuífero, y muestras del efluente recargado y del agua subterránea para el control de la calidad por medio de análisis químicos y microbiológicos.

El muestreo de agua del subsuelo se realizará en una instalación especial, tomándose muestras del efluente percolado en la zona no saturada y también mediante muestras tomadas del acuífero y de pozos de observación y de recuperación. Las muestras serán tomadas en una instalación especial ubicada debajo del fondo de los campos de recarga, estando ubicados los pozos a diversas distancias de los dichos campos, a fin de determinar el tiempo y la distancia del recorrido del efluente recargado en el acuífero y los cambios en la calidad del agua que se ha producido.

El volumen del efluente recargado se calculará diariamente, las mediciones de nivel en los campos de infiltración se

deberán realizar semanalmente y las de los niveles de agua subterránea mensualmente.

El control de la calidad del efluente de recarga se realizará mediante un análisis de unas 65 características físico-químicas y biológicas a varias frecuencias, desde diarias hasta mensuales. La calidad del efluente percolado se determinará cada 15 días.

En la fig. 7.3 se muestra el esquema de la planta de demostración de recarga en Flushing Meadows. La planta estuvo en operación durante 10 años (1968-1978), durante este período se pudieron distinguir dos etapas diferentes. En los primeros 5 años los experimentos estuvieron encaminados a la determinación de una carga hidráulica óptima, mientras que en los últimos 5 años el objetivo principal consistió en la obtención de una tasa máxima de remoción de compuestos de nitrógeno.

Durante el primer período, la infiltración intermitente fue de 14 a 20 días de inundación, por 10 días de secado, obteniéndose los mejores resultados, con una tasa de infiltración de 0.34 metros por día, manteniéndose la profundidad del agua en los campos de recarga a 0.30 metros.

En el segundo período se obtuvieron mejores resultados con respecto a la remoción de compuestos de nitrógeno al modificarse la pauta de infiltración de 9 días de inundación y 12 días de secado, con una disminución en la altura del agua de los campos a 0.15 metros; consecuentemente la tasa de infiltración también disminuyó a cerca de 0.17 metros por día.

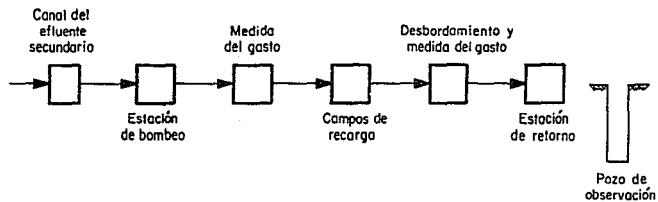


FIGURA 7.3 ESQUEMA DE LA PLANTA DE DEMOSTRACIÓN DE RECARGA, FLUSHING MEADOWS, E.U.

VII.3A Posibles Sitios de Recarga en el Distrito Federal  
(proyecto de demostración de recarga de aguas residuales  
tratadas DGCOH, 1982)

Para la selección del sitio adecuado, se seguirán las siguientes posibilidades:

- a) Ubicación del proyecto de recarga dentro de los límites del Distrito Federal, y utilización del agua recuperada en usos que no requieran el carácter de agua potable.
- b) Ubicación dentro del Valle de México, pero fuera de los límites del Distrito Federal, lo que permitiría ejecutar un proyecto más ambicioso y con menos restricciones.

La selección de los sitios potencialmente adecuados para la ubicación del proyecto se basó principalmente en la información disponible acerca de la geología y la hidrología del Valle de México, la cual permitirá descartar algunas zonas debido a inconvenientes tales como riesgo obvio de contaminación de pozos cercanos que bombean agua potable, falta de condiciones adecuadas para recargar a través de lagunas de infiltración y consideraciones económicas.

Los criterios considerados en la selección de la ubicación del proyecto fueron las siguientes:

- 1) Las características geológicas del acuífero y de las capas suprayacentes al mismo, las cuales determinarán en gran medida no solo la posibilidad misma de recarga, sino también el método a aplicar y las investigaciones necesarias para la ejecución del proyecto.

2) La posibilidad potencial de recargar el acuífero mediante lagunas de infiltración, en vez de pozos. Esta posibilidad permitirá reducir considerablemente tanto las inversiones como los gastos anuales de operación.

3) La disponibilidad de áreas suficientes en los alrededores inmediatos del sitio considerado, con miras a ampliar considerablemente las operaciones de recarga en el futuro, a través de lagunas de infiltración.

4) La posibilidad práctica de recuperar el agua recargada, mediante pozos de bombeo situados cerca de las áreas de recarga, para usos que no requieran agua potable.

5) La posibilidad práctica de obtener los terrenos necesarios para el proyecto de recarga.

6) La disponibilidad de un acceso libre y fácil al sitio del proyecto.

Los sitios examinados dentro de los límites del Distrito Federal fueron ocho, los que se considerarán potenciales, en primera instancia para la ubicación del proyecto de recarga de aguas negras tratadas dentro de los límites del Distrito Federal. De estos, los siguientes cuatro fueron descartados, con base en los parámetros anteriores:

- \* Ajusco,
- \* San Mateo Xalpa,
- \* Santa Fe,
- \* San Juan de Aragón.

Los cuatro sitios restantes, fueron seleccionados para un examen más profundo, los cuales se localizan al sureste del Distrito Federal. En todos ellos el acuífero está constituido por basaltos, pero los cuatro sitios difieren en cuanto a la naturaleza, estructura y espesor de la cubierta que suprayace a los derrames basálticos. Para obtener una idea preliminar de la permeabilidad de estas cubiertas geológicas se han realizado pruebas de infiltración en varios puntos dentro de los sitios considerados. (Proyecto de demostración de aguas residuales tratadas DGCOH, 1982)

Teniendo en cuenta la disponibilidad actual de aguas residuales tratadas para el proyecto de recarga, se estima, que al menos en un futuro próximo, los cuatro sitios tendrán que basarse en las aguas tratadas de la planta del Cerro de la Estrella, que aún no trabaja de manera adecuada.

#### Santa Catarina Poniente:

El sitio considerado, cuya área es aproximadamente de 70 hectáreas, está situado a un cota de 2300 metros sobre el nivel del mar, y presenta una configuración topográfica adecuada para la recarga de acuíferos. El terreno está formado por capas de arena volcánica con variación de finos a gruesos, gravas y boleas aislados, de varios metros de espesor, que cubren derrames basálticos recientes. La inclinación de dichos derrames es al rumbo sur, constituyendo el basamento del relleno lacustre y aluvial del valle comprendido entre Xochimilco y San Pedro Tláhuac.

Al sur-suroeste (SSW) del área considerada se encuentran los pozos 4 y 5 de Santa Catarina, los cuales están ubicados aproximadamente a 2 kilómetros del sitio de recarga propuesto.

Cabe suponer que el agua recargada en este sitio por medio de lagunas se infiltrará a través de las capas no saturadas y llegará al acuífero basáltico, siendo probable su flujo al sur, es decir, hacia el centro del valle.

No es ilógico pronosticar que el agua servida tratada que se recargue en el sitio, pueda llegar a los pozos de Santa Catarina que extraen agua del acuífero de basalto.

Este sitio potencial posee una ventaja adicional, principalmente económica, que es la corta distancia de la línea de conducción del efluente al área considerada.

**\* Santa Catarina Oriente**

El sitio examinado se encuentra ubicado al suroeste del volcán la Culebra, siendo su elevación aproximada de 2330 metros sobre el nivel del mar. El área presenta una configuración topográfica muy irregular y por tanto, para llevar a cabo el proyecto de infiltración a través de lagunas sería necesario realizar grandes obras de movimiento de tierras.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la zona presenta una cubierta similar al sitio precedente de Santa Catarina Poniente, localizándose sólo un pozo de agua potable (Santa Catarina 1) a una distancia aproximada de 3 kilómetros

del sitio, propuesto. La distancia entre la línea de conducción de aguas residuales tratadas y el área considerada es de alrededor de 7 kilómetros.

#### San Pedro Actopan:

El área está situada al suroeste del volcán Teuhtli. Presenta una elevación de 2335 metros sobre el nivel del mar, y una configuración topográfica adecuada para el proyecto de recarga. Cabe señalar, sin embargo, que las áreas que pueden utilizarse en el futuro para el desarrollo del proyecto en esta zona no son muy amplias, localizándose especialmente a lo largo de la carretera México-Actopan-Milpa Alta.

El terreno es generalmente plano y ostenta una cubierta aluvial de finos, como limos y arenas que suprayacen a derrames basálticos inclinados hacia el norte. Estos derrames constituyen el acuífero del cual se extrae el agua por los pozos del ramal de San Luis, siendo la distancia de éstos al área considerada de 4 kilómetros.

#### Milpa Alta:

La zona examinada, que se ubica al sur del volcán Teuhtli, muestra una elevación de 2340 metros sobre el nivel del mar y una configuración topográfica conveniente para el proyecto de recarga. Desde el punto de vista hidrogeológico, la cubierta que se presenta en el terreno es similar a la zona de San Pedro Actopan, de la que difiere sólo en el espesor de la cubierta.



La distancia de este sitio a la batería de pozos del ramal Tecomitla es de aproximadamente 3 kilómetros.

**VII.3B Sitios de recarga fuera de los límites del Distrito Federal:**

El área del Distrito Federal constituye solamente el 15% de la superficie total de la cuenca del Valle de México y se le localiza en la parte sur-poniente de este valle. Si bien es probable que el valle en su totalidad forme una sola cuenca de agua subterránea, se considera que la conexión hidrológica entre los acuíferos del Distrito Federal y los que se encuentran en el norte del valle no es muy fuerte, y por lo tanto las condiciones hidrológicas al norte de la Sierra de Guadalupe y Chiconautla no tiene una influencia directa y rápida en los acuíferos dentro del Distrito Federal.

En la región norte del Distrito Federal son aluviales en el centro del valle y basálticos en las margenes. En toda esta región existe un bombeo promedio de aproximadamente de 10 m<sup>3</sup>/s, que causa un abatimiento continuo y paulatino del nivel freático.

En la región norte del Distrito Federal, la única fuente importante de aguas residuales es el Gran Canal, que conduce aguas residuales no tratadas desde el Distrito Federal al valle de Tula.

El aprovechamiento de las aguas residuales del Gran Canal, ya sea a través de lagunas de infiltración o por medio de pozos, exigirá la construcción de una planta de tratamiento,

además del proyecto de recarga. Por consiguiente, al seleccionar el sitio del proyecto de recarga se deberá tomar en cuenta entre todos los parámetros, también la necesidad de construir cerca del Gran Canal o del sitio del proyecto una planta de tratamiento, cuyas características se podrán determinar sólo una vez que se haya seleccionado el área del proyecto de recarga y el método de la misma.

Para la selección de un sitio para el proyecto de recarga fuera de los límites del Distrito Federal, se llevó un reconocimiento de cinco zonas potenciales, cuatro de las cuales fueron rechazadas después de un primer examen; estas son las zonas:

- Temascalapa.
- San Lucas Xolax.
- Melchor Ocampo.
- Nicolás Romero.

Las tres primeras poseen acuíferos basálticos y en la cuarta existe una cubierta aluvial sobre capas de la formación Tarango. Estas zonas se rechazaron por una o más de las siguientes razones:

- La gran distancia del Gran Canal.
- La limitación del área disponible para el tratamiento y recarga.
- La existencia de pozos de agua potable en la vecindad de la zona considerada.
- La falta de características hidrológicas adecuadas.

La quinta zona reconocida es la de Zumpango de Ocampo, cuya elevación topográfica es de 2260 metros sobre el nivel del mar. Esta zona pertenece al antiguo delta del río de las avenidas de Pachuca, que se encuentra a 4 kilómetros del Gran Canal.

La superficie del terreno se encuentra en este sitio a unos 20 o 30 metros sobre el acuífero aluvial del delta. La zona presenta una configuración topográfica adecuada para el proyecto de recarga: ostenta una cubierta del suelo limo-arcilloso de 0.5 a 1.0 metros de espesor, que sobreyace a las arenas de grano fino a grueso.

Esas capas de arena y el intervalo de 20 a 35 metros entre la superficie y el nivel freático forman un medio excelente para el mejoramiento adicional de aguas residuales tratadas, así como para el almacenamiento subterráneo de grandes cantidades de agua.

Aunque todavía no se ha efectuado una investigación hidrológica en la zona, la impresión general es que no habría dificultad en explotar las aguas recargadas mediante bombeo, ya que actualmente no se cuenta con una gran cantidad de pozos en la zona considerada.

#### VII.4 Características del sitio seleccionado

La ubicación del proyecto depende de varios factores, uno de los cuales es la disponibilidad del agua residual tratada en cantidad y calidad física-química-biológica adecuada, y a una distancia razonable del sitio del proyecto propuesto.

Cabe mencionar que en la selección de la fuente por utilizar, se ha considerado no sólo la cantidad necesaria para el proyecto inicial, que es aproximadamente de 10,000 metros cúbicos por día; sino también caudales varias veces mayores para la recarga del acuífero en el proyecto definitivo.

El caudal total de aguas residuales domésticas e industriales que se generan en el Distrito Federal, es aproximadamente de 40 metros cúbicos por segundo. La mayor parte de este volumen está siendo aprovechado para el riego de vastas áreas en el Valle de México y en el Valle de Tula. Estas aguas residuales no reciben ningún tratamiento planificado antes de su reuso para riego.

Debido principalmente a consideraciones económicas, no existe en el Distrito Federal tratamiento adecuado para todas las aguas residuales generadas. Tanto en el pasado como en el presente, el tratamiento está limitado a las cantidades destinadas a usos bien definidos.

Dentro de los límites del Distrito Federal, existen once plantas de tratamiento de aguas residuales, diez de las cuales pertenecen al Departamento del Distrito Federal. La capacidad nominal total de las plantas del Departamento del Distrito Federal es de 4.3 metros cúbicos por segundo. Los efluentes sirven principalmente para el riego de parques públicos y áreas verdes y para el llenado de lagos recreativos.

Desde el punto de vista de planeación, diseño y selección del sitio de proyecto, y en conformidad con el efluente para el proposito de recarga, es importante considerar las plantas de tratamiento de acuerdo a los siguientes criterios:

- Ubicación de la planta de tratamiento.
- Capacidad nominal de la planta.
- Capacidad efectiva de la planta.
- Planes existentes para el mejoramiento de las instalaciones.
- Planes de ampliación para el futuro.
- Procedencia de las aguas residuales crudas.
- Calidad de las aguas residuales crudas.
- Calidad de las aguas residuales tratadas.
- Reúso actual y potencial del efluente.
- Fluctuaciones en la demanda del efluente.
- Facilidades de almacenamiento cerca de la planta de tratamiento.
- Instalaciones, estaciones de bombeo y líneas de conducción, para la utilización del efluente.

Tomando en cuenta la operación actual de las plantas de tratamiento y de sus planes de rehabilitación y extensión, y tomando en cuenta que el proyecto inicial de recarga deberá basarse en una cantidad mínima de aproximadamente 10,000 metros cúbicos por día, resulta obvio que las fuentes de agua tratada para el proyecto son prácticamente muy limitadas.

Si se agrega a esto el problema de ubicación del proyecto desde el punto de vista hidrológico y económico, se llega

fácilmente a la conclusión de que la única fuente que puede satisfacer las exigencias del proyecto de recarga es la planta de tratamiento Cerro de la Estrella.

Habiendo definido la posible fuente de recarga, el sitio más ventajoso dentro del Distrito Federal, es el referente a Santa Catarina Poniente. Esta referencia se basó en las siguientes consideraciones:

- a) Las condiciones hidrológicas son adecuadas.
- b) El nivel topográfico no es demasiado alto.
- c) La configuración topográfica es adecuada para realizar la recarga a través de lagunas de infiltración.
- d) El conducto de agua residual tratada proveniente de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella se encuentra a corta distancia del sitio considerado.

El sitio preferible en el Valle de México, pero fuera de los límites del Distrito Federal, es el que se localiza al oriente del lago de Zumpango, ubicado a 30 kilómetros al norte de la ciudad. Las razones que justifican esta selección son las siguientes:

- 1) La existencia de un acuífero aluvial, que al menos en su parte superior, tiene buena conexión hidráulica con la superficie.
- 2) La existencia de capas de arena de espesor considerable y con una cubierta muy fina de suelo, que ocupa vastas áreas encima del acuífero y que son adecuadas para la recarga a través de lagunas de infiltración.

- 3) La disponibilidad de vastas áreas de terreno de costo relativamente bajo que se prestan a la construcción de una planta de tratamiento con lagunas abiertas.
- 4) La proximidad del sitio a una fuente importante de aguas residuales, como lo es el Gran Canal.
- 5) La posibilidad de utilizar el agua recuperada para riego ilimitado de cultivos en la zona agrícola del delta.
- 6) La posibilidad de aprovechar el acuífero para almacenamiento estacional.
- 7) Riesgo mínimo de contaminación de los pozos vecinos de agua potable.

#### VII.5 Descripción General del Sitio Seleccionado

La selección del sitio para la implementación del proyecto se efectuó con base en criterios geológicos, hidrológicos y topográficos, presentandose también atención especial a los aspectos de la calidad del agua subterránea y el peligro de contaminación de la misma, la capacidad de infiltración del terreno y otros criterios técnicos y administrativos.

El sitio propuesto esta ubicado en la parte occidental de la ladera sur de la sierra de Santa Catarina y satisface, según se estima, todas las condiciones básicas exigidas para la ubicación del proyecto.

Esta zona se localiza alrededor del poblado de Santiago Zapotitlán y en ella se encuentran los pozos Santa Catarina 2, 3, 4, 5 y 6 (SC-2, SC-3, SC-4, SC-5, SC-6) los que se ubican en un tramo con una longitud de 4.5 kilómetros.

**Geología.** - La geología del subsuelo de la zona seleccionada para la inyección de las aguas tratadas se encuentra constituida esencialmente por materiales granulares con intercalaciones de cenizas volcánicas las cuales presentan buena permeabilidad. Cubriendo a estos materiales y al sur de la sierra de Santa Catarina, o sea a la parte correspondiente al antiguo lago de Xochimilco-Chalco, se encuentra un espesor de aproximadamente 60 metros de arcillas lacustres de reducida permeabilidad.

De acuerdo a los conocimientos geológicos actuales, la sierra de Santa Catarina se encuentra conformada por brechas volcánicas basálticas, corrientes de lava, tezontle, depósitos cineríticos y piroclásticos. En general, la zona presenta altos coeficientes de porosidad y permeabilidad, y constituye el área principal de captación de los acuíferos dentro de la zona.

Para definir la estratigrafía en la zona de recarga y en base al corte geológico del pozo de Santa Catarina 4, que se encuentra aproximadamente a 1,000 metros del centro de la zona, se procedió a realizar una sección geológica de la cual se dedujo la siguiente columna estratigráfica:



- 0 - 10 metros arena, grava y boleos volcánicos.
- 10 - 30 metros lapilli con tezontle.
- 30 - 50 metros basalto.
- 50 - 70 metros lapilli con ceniza.
- 70 metros basalto con alternancia de arenas.

La profundidad de cada capa serán tentativas ya que éstas dependerán de las condiciones de depósitos de las mismas.

En lo que respecta a la elevación del nivel freático debajo de la zona de recarga, se observan los siguientes hechos geohidrológicos:

- a) El nivel freático en el pozo más cercano se sitúa aproximadamente a 2230 metros sobre el nivel del mar.
- b) Si se considera que el centro de la zona de recarga se encuentra a una cota de 2300 metros sobre el nivel del mar, el nivel estático estará aproximadamente entre 70 y 80 metros de profundidad.

Geohidrología.- Se ha estimado que el sitio propuesto para el proyecto de recarga, el agua se halla a una profundidad de 70 a 80 metros bajo el nivel del suelo.

El agua subterránea proviene de las precipitaciones que se infiltran por el suelo a través de las capas permeables y de la cobertura superior.

El volumen de las precipitaciones que se registran en el área de la sierra de Santa Catarina alcanzan aproximadamente de 600 a 650 milímetros por año, como promedio y alrededor

de un 40 a 50% de la lluvia se infiltra a la capa de agua subterránea.

En la parte sur del Valle de México se desprende que por debajo de la cumbre de la sierra de Santa Catarina se encuentra un parteaguas subterráneo, que ocasiona que una parte del agua infiltrada llegando al agua subterránea, se traslade en dirección norte y otra parte hacia el sur. El sitio propuesto está localizado al sur de esta sierra.

Cabe señalar que el flujo hacia el sur se ha incrementado en los últimos años ya que en esa dirección se encuentra el sistema de pozos de Santa Catarina, del cual se bombea agua proveniente sobre todo del acuífero basáltico, que es alimentado por el agua infiltrada en la sierra de Santa Catarina.

Más hacia el sur se encuentra el Valle Tlahuac-Xochimilco, que desde el punto de vista hidrológico constituye parte del acuífero aluvial-lacustre del Valle de México. En el centro del este valle existe un campo de pozos (sistema Tlahuac-Netzahualcoyotl), del cual se bombea agua de las capas basálticas que se prolongan en los bordes del valle.

En la parte sur del valle, a lo largo de las laderas de las sierras volcánicas, se encuentran los sistemas de San Luis y Tulyehualco, de cuyos pozos se bombea agua subterránea del acuífero basáltico de esta zona.

Como consecuencia del bombeo del agua subterránea de los acuíferos basálticos, a ambos lados del valle, y del bombeo

de las capas aluviales-lacustres en el centro del valle, se ha creado una depresión en el nivel freático, por ejemplo, los niveles bajarón en aproximadamente 12 a 13 metros durante el período de 1963 a 1981 en los pozos de Santa Catarina.

Como resultado del abatimiento de los niveles se supone que se registrarón hundimientos del suelo en el área aluvial y quizás en un empeoramiento de la calidad del agua.

Topografía y Geografía.- El sitio propuesto de recarga goza de buenas condiciones topográficas y geográficas que permitirán realizar sin mayores esfuerzos la planeación y preparar el terreno en forma apropiada para la recarga, tanto en la primera etapa como en las etapas posteriores que requieran superficies mayores.

Según el mapa topográfico, aparentemente en el centro del área el nivel del suelo se encuentra a una cota de unos 2300 metros sobre el nivel del mar y una suave pendiente de 4 a 6%, con tendencia en dirección sur.

La superficie total que puede ser preparada para los fines expuestos abarca aproximadamente 80 hectáreas, en tanto que en la primera etapa, solamente se requerirá del 10% (fig 7.4)

La distancia del centro del área propuesta a los pozos de Santa Catarina 4 y 5 es de 1250 metros, y más de 2000 metros a los otros pozos de Santa Catarina. La distancia entre el sitio propuesto y la conducción existente, que acarrea el efluente de la planta de tratamiento del Cerro de la

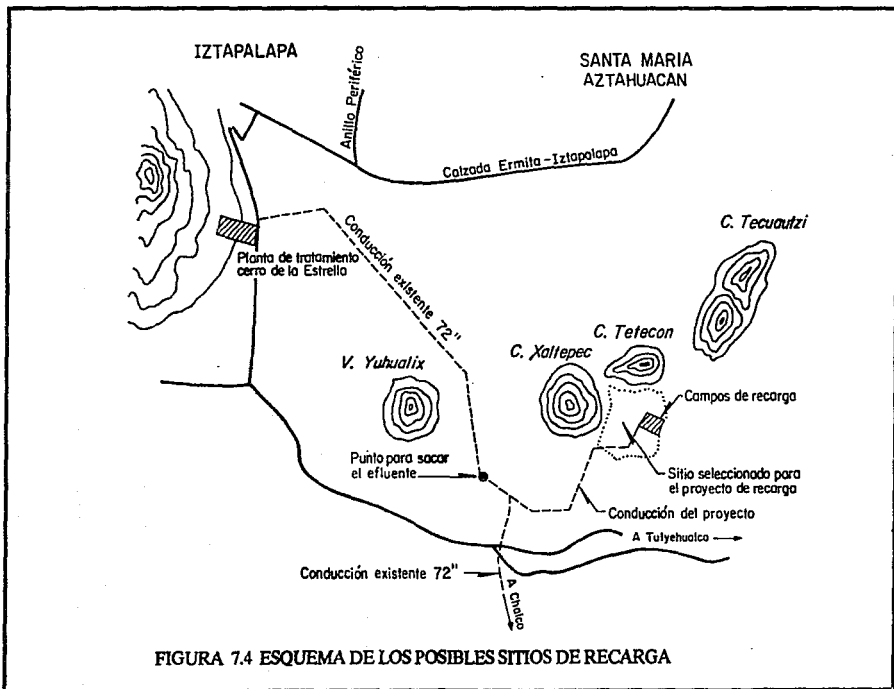


FIGURA 7.4 ESQUEMA DE LOS POSIBLES SITIOS DE RECARGA

Estrella en dirección a Tláhuac, no supera los 2000 metros. Por lo tanto no se prevén dificultades para unir el área seleccionada para el proyecto con el sitio de procedencia del efluente.

Desde el norte al sitio propuesto para la recarga se extienden sierras de origen volcánico, que constituyen el parteaguas superficial, y al sur, como ya fue mencionado, se encuentra el valle de Xochimilco-Tláhuac.

## C O N C L U S I O N E S

La sobreexplotación del acuífero de la Ciudad y la disminución de sus áreas naturales de recarga, como consecuencia de la expansión de la mancha urbana, ha modificado el equilibrio natural del recurso, generando efectos colaterales como el abatimiento de los niveles piezométricos, cambios en la calidad del agua subterránea y hundimientos diferenciales y regionales de los más importantes.

En relación con el abatimiento de los niveles piezométricos la cota del agua, a principios de siglo, se encontraba a profundidades someras, actualmente ha descendido profundidades medias de 40 metros en el Centro del Valle y de 100 metros en las Sierras que lo rodean.

En cuanto a la calidad del agua subterránea al generarse mayores gradientes hidráulicos se produce el flujo de agua almacenada en algunas zonas del acuífero que contienen, de manera natural, mayores concentraciones de elementos como sales y carbonatos, los cuales necesitan de procesos complejos para su potabilización.

El hundimiento del terreno, provocado por el descenso del nivel del agua en el acuífero por debajo de los estratos arcillosos, generan el drenado de las arcillas al presentarse un flujo vertical hacia el acuífero en explotación. Este fenómeno se ha presentado con hundimientos medios anuales hasta de 40 centímetros en algunas zonas de la Ciudad.

El Departamento del Distrito Federal cuenta con 320 pozos piloto los cuales sirven para que anualmente se realicen mediciones del nivel estático para poder determinar los sentidos de flujo de agua y los cambios en los almacenamientos del acuífero.

Por todos los efectos anteriormente mencionados es de suma importancia determinar una política de recarga de los acuíferos del Valle de México, por medio ya sea de pozos de infiltración como de lagunas, para evitar daños mayores tanto a los recursos naturales como a la infraestructura de la zona.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- PERFORACION DE POZOS PARA AGUA.  
CENTRO DE ACTUALIZACION PROFESIONAL, COLEGIO DE  
INGENIEROS CIVILES DE MEXICO.  
COORD. DR. RAFAEL MORALES Y MONROY
- 2.- RECARGA ARTIFICIAL DE MANTOS ACUIFEROS.  
TESIS PROFESIONAL, ACATLAN, EDO. DE MEXICO AGOSTO 1988  
JOSE ANGEL RANGEL RAYON
- 3.- ARTIFICIAL RECHARGE OF GROUND WATER  
A.I. JOHNSON AND DONALD J. FINLAYSON
- 4.- LA CAPTACION DE AGUAS SUBTERRANEAS  
JEAN PIMIENTA  
EDITORES TECNICOS ASOCIADOS S.A. BARCELONA 1973
- 5.- ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE INFILTRACION CON AYUDA DEL  
BORDO EL IHUAGIL PARA LA RECARGA DE UN ACUIFERO EN  
EL VALLE DE STO. DOMINGO, B.C.S.  
TESIS PROFESIONAL, FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM. 1984  
ABRAHAM GERARDO HERNANDEZ
- 6.- APUNTES DE ASPECTOS FUNDAMENTALES EN EL ESTUDIO DEL  
AGUA SUBTERRANEA (GEOHIDROLOGIA)  
FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM  
ING. JAIME TINAJERO GONZALEZ



- 7.- APUNTES DE GEOHIDROLOGIA  
CENTRO DE ACTUALIZACION PROFESIONAL, COLEGIO DE  
INGENIEROS CIVILES DE MEXICO, 1986  
ING. RAFAEL XELHUANTZI AVILA
  
- 8.- MANUAL DE OBRAS CIVILES. HIDROTECNIA, A.1.12.  
GEOHIDROLOGIA C.F.E.
  
- 9.- HYDRAULICS OF WELL  
MAHDI S. HANTUSH  
NEW MEXICO INSTITUTE OF MINING AND TECHNOLOGY
  
- 10.- MANUAL DE EXPLOTACION GEOTECNICA.  
SECRETARIA GENERAL DE OBRAS DEL DEPARTAMENTO DEL  
DISTRITO FEDERAL MEXICO, D.F. 1988.
  
- 11.- PROYECTO DE DEMOSTRACION DE RECARGA DE AGUAS RESIDUALES  
TRATADAS, DIRECCION GENERAL DE CONSTRUCCION Y OPERACION  
HIDRAULICA DDF. TOMO I Y II MEXICO 1982: