



7  
24

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES**

**“ARAGON”**

**ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LAS PRUEBAS DE  
BOMBEO EN HIDRAULICA DE POZOS**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A  
LEONARDO MARQUEZ LOPEZ**

**MEXICO, D. F.**

**ABRIL 1986**



## **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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
ARAGON

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGON  
D RECCION

LEONARDO MARQUEZ LOPEZ  
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 11 de marzo del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. MAURICIO CARRILLO GARCIA pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado "ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO EN HIDRAULICA DE POZOS ", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para reiterar a usted las bondades de mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
San Juan de Aragón, Méx., marzo 14 de 1985.  
EL DIRECTOR

LIC. SERGIO ROSAS ROMERO

c.c.p. Coordinación de Ingeniería (21).  
Unidad Académica.  
Departamento de Servicios Escolares.  
Asesor de Tesis.

## I N D I C E

CAPITULO I.	INTRODUCCION
I-1.	Antecedentes
I-2.	Aguas Subterráneas y Aguas Superficiales
I-3.	Importancia de la Hidráulica Subterránea
I-4.	Alcance del Tema de Tesis
I-5.	Desarrollo de la Tesis
CAPITULO II.	CONCEPTOS GENERALES
II-1.	Introducción
II-2.	El Ciclo Hidrológico
II-3.	El Agua Subterránea
II-4.	Distribución Subsuperficial del Agua
II-5.	Los Acuíferos o Embalses Subterráneos
II-5.1	Tipos de Acuíferos
II-6.	Nociones Hidrológicas de las Rocas
II-6.1	Definiciones
II-6.2	Porosidad y Permeabilidad de las Rocas
II-6.3	Caudales

- II-6.4      Calidad del Agua
- II-7.      Nociones Hidrológicas de los Depósitos  
            No Consolidados
- II-7.1     Introducción
- II-7.2     Características Generales
- II-7.3     Porosidad y Permeabilidad
- II-7.4     Caudales
- II-7.5     Calidad del Agua
- II-8.      Definición de Términos Empleados en las  
            Pruebas de Bombeo de los Pozos de Agua
- II-9.      Propiedades Hidrológicas de los Material  
            les Portadores de Agua
- II-9.1     Porosidad
- II-9.2     Permeabilidad
- II-9.3     Coeficiente de Permeabilidad
- II-9.4     Transmisibilidad
- II-9.5     Rendimiento Específico
- II-9.6     Capacidad de Retención Específica
- II-9.7     Coeficiente de Almacenamiento
- II-10.     Ley de Darcy

<b>CAPITULO III.</b>	<b>PRUEBAS DE BOMBEO</b>
III-1.	Introducción
III-2.	Objetivos de las Pruebas de Bombeo
III-3.	Tipos de Pruebas de Bombeo
III-4.	Selección del Lugar de la Prueba de -- Bombeo
III-5.	Características del Pozo de Bombeo
III-6.	Piezómetros y Pozos de Observación
III-6.1	Piezómetros
III-6.2	Pozos de Observación
III-7.	Emplazamiento de los Pozos de Observa-- ción
III-8.	Número de Pozos de Observación
III-9.	Medidas y Ajuste del Caudal
III-10.	Medidas de los Niveles de Agua
III-11.	Duración de las Pruebas de Bombeo
III-12.	Vertido del Agua Extraída

<b>CAPITULO IV.</b>	<b>HIDRAULICA DE POZOS</b>
IV-1.	Introducción
IV-2.	Mecanismo del Flujo Hacia un Pozo

- IV-3. Efectos de la Recarga en los Acuíferos
- IV-4. Efectos de la Barrera en los Acuíferos
- IV-5. Efectos de la Penetración Parcial
- IV-6. Conceptos de Régimen Permanente y Régimen No Permanente
- IV-7. Relación de la Ley de Darcy y la Ecuación de Thiem
- IV-8. Teorías de la Hidráulica de Pozos Completos a Caudal Constante y en Régimen Permanente
  - IV-8.1 Pozos en Acuíferos Confinados  
Método de Thiem
  - IV-8.2 Pozos en Acuíferos Libres  
Corrección de C.E. Jacob
- IV-9. Teorías de la Hidráulica de Pozos Completos a Caudal Constante y en Régimen No Permanente
  - IV-9.1 Pozos en Acuíferos Confinados  
Método de C.V. Theis
  - IV-9.2 Pozos en Acuíferos Libres  
Método de Theis
  - IV-9.3 Pozos en Acuíferos Confinados  
Aproximación Logarítmica de C.V. Jacob

- IV-9.4 Pozos en Acuíferos Semiconfinados  
Método de Walton-Hantush
- IV-9.5 Método para el Cálculo Aproximado del  
Coeficiente de Almacenamiento
- IV-10. Aplicación de la teorías de Theis y --  
Jacob en la Zona de Calera de Victor -  
Rosales, Estado de Zacatecas
- IV-10.1 Localización de la Zona de Calera de -  
Victor Rosales
- IV-10.2 Antecedentes
- IV-10.3 Uso del Agua Potable
- IV-10.4 Aprovechamientos Superficiales
- IV-10.5 Hidrología Superficial
- IV-10.6 Estratigrafía de la Cuenca de Calera
- IV-10.7 Litología y Registros Eléctricos Reali  
zados en la Cuenca
- IV-10.8 Recarga y Descarga del Acuífero
- IV-10.9 Pruebas de Bombeo
- IV-10.10 Interpretación de las Pruebas de Bombeo

## CAPITULO V.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## BIBLIOGRAFIA



## CAPITULO I

### INTRODUCCION

#### I-1. Antecedentes

Estimaciones comparativas han revelado que, a nivel mundial, el recurso hidráulico disponible en el subsuelo es mucho mayor que el disponible en la superficie. Según una de dichas estimaciones, más del 90% del agua dulce existente en la Tierra se encuentra bajo la superficie del terreno; otras de ellas indica que el volumen de agua almacenada en el subsuelo de nuestro planeta es unas 20 veces mayor que el agua dulce superficial.

Independientemente de la dudosa precisión de las cifras anteriores, el hecho es que las fuentes de agua superficial ya están siendo aprovechadas en su mayoría, mientras las demandas continúan aumentando progresivamente a causa de la explosión demográfica. Esto significa que en el futuro las demandas de la población tendrán que ser satisfechas en ma-

por proporción con agua procedente de las fuentes subterráneas. Si a esto se agrega que gran parte del planeta está ocupado por zonas desérticas, donde el único recurso hídrico disponible se encuentra en el subsuelo, queda fuera de toda duda la gran importancia de este recurso.

## I-2. Aguas Subterráneas y Aguas Superficiales

Pero además de su mayor abundancia, el agua subterránea presenta, por naturaleza, varias ventajas con respecto al agua superficial, como son:

- 1).- Menores pérdidas por evaporación. Todos los recipientes de agua superficial pierden cantidades significativas de agua por evaporación. En cambio, los recipientes subterráneos sólo pierden cantidades importantes de agua por evapotranspiración cuando los niveles freáticos se encuentran muy someros.
- 2).- Menor exposición a la contaminación. Es bien sabido que uno de los grandes problemas de la actualidad es el de la contaminación: la mayoría de las corrientes y masas de agua superficial se están contaminando rápidamente en mayor o menor grado. El agua subterránea, en cambio, está relativamente salvaguardada de este perjuicio, gracias a que los materiales granulares funcionan como un gran filtro que retiene los contaminantes, especialmente los biológicos y aunque existe la contaminación química provocada por -

un mal manejo del recurso, la baja velocidad - con que el agua circula en el subsuelo no propicia su rápida propagación a grandes áreas como en la superficie.

- 3).- Disponibilidad menos afectada por las variaciones climáticas. Uno de los problemas más serios que enfrenta el aprovechamiento de las aguas -- superficiales, es que su disponibilidad depende especialmente de las variaciones de la precipitación pluvial, al grado de que en uno o dos -- años secos consecutivos tal disponibilidad puede ser prácticamente nula. Por el contrario, los recipientes subterráneos resultan, en general, mucho menos afectados por esto, gracias a que -- existe una reserva almacenada, acumulada durante siglos, generalmente mucho mayor que la recarga anual, permitiendo una explotación más flexible del recurso.
- 4).- Distribución más amplia en el área. El agua superficial es un recurso transitorio y su presencia es relativamente localizada. Su aprovechamiento en gran escala, por tanto, requiere de -- obras de almacenamiento y conducción. En cambio, en el subsuelo tiene una distribución muy amplia lo que permite su captación en el sitio donde -- va a ser utilizada, o en sus inmediaciones. El vaso de almacenamiento ya existe en el subsuelo construido por la naturaleza, y funciona al ---

mismo tiempo como un gran conducto.

5).- No hay pérdidas en la capacidad del almacenamiento. Todo vaso superficial pierde gradualmente - su capacidad de almacenamiento al ser azolvado por los sedimentos que transportan las corrientes que lo alimentan, hasta que eventualmente - puede quedar inutilizado. La capacidad de almacenamiento de los vasos subterráneos no es afectada significativamente en la mayoría de los -- casos.

6).- Temperatura constante del agua. El agua superficial, al estar expuesta a los cambios atmosféricos, varía continuamente en su temperatura. Por otro lado, la temperatura del agua subterránea es casi constante, debido a que el subsuelo funciona como un regulador térmico.

El recurso subterráneo presenta la desventaja de no ser visible, y por esto dificulta seriamente su estudio, su cuantificación, su explotación racional y su manejo; sin embargo, los estudios geohidrológicos, en cuya realización intervienen diversas disciplinas en forma complementaria, tienen por objetivo el esclarecimiento de estas cuestiones. Por lo anterior, resulta lo más natural que nos inclinemos a pensar que las aguas superficiales constituyen la mayor fuente para el consumo de la población, puesto que todas - las obras construidas para su captación son visibles, pero en realidad muchas naciones incluyendo la nuestra reciben

la mayor parte de sus recursos de agua a partir de los yacimientos de agua subterránea. Estos yacimientos son explotados artificialmente por medio de estructuras que genéricamente reciben el nombre de "pozos de bombeo".

México concretamente obtiene de fuentes subterráneas una parte muy substancial de agua que utiliza, ya sea para fines agrícolas, industriales o de consumo doméstico, parte que se ha llegado a valorar hasta en un 45% de sus disponibilidades totales.

### I-3. Importancia de la Hidráulica Subterránea

La mayoría de los más importantes progresos realizados en el campo de la hidráulica subterránea han sido estimulados por los estudios dirigidos hacia la resolución de problemas de gran importancia económica, éstos han ocupado la atención de muchos investigadores, quienes al principio desarrollaron una tecnología esencialmente empírica, pero que a través de los años se ha fortalecido y respaldado con -- nuevas teorías a tal grado que hoy puede hablarse de una -- auténtica hidráulica de pozos, especialidad que cuenta con sus propias hipótesis de trabajo, sus propias teorías y, -- en muchos casos sus propias soluciones a grandes problemas importantes. Evidentemente, la teoría afectada por hipótesis sobre la naturaleza del suelo y sobre sus condiciones frontera, trabaja sobre esquemas que no corresponden del todo a las realidades de campo, pero que si dan valores -- útiles y que en combinación con las normas de una ya vieja experiencia y del apoyo de otras ciencias como son la ---

hidrología, la geología y las matemáticas, han puesto las bases para una técnica cuya contribución al progreso social ha sido enorme.

#### I-4. Alcance del tema de Tesis

El presente trabajo pretende mostrar en una forma por demás simple y sencilla los aspectos fundamentales en las pruebas de bombeo, que tienen por objeto la determinación de los parámetros que definen el comportamiento de un acuífero ante la acción de un pozo y dentro de un marco de una teoría determinada; constituyendo al mismo tiempo una obra de consulta para dar soluciones a problemas similares que se presenten en el transcurso de la vida profesional del ingeniero que se interese en la hidráulica de pozos.

#### I-5. Desarrollo de la Tesis

Para lograr los objetivos de la Tesis, se dividió en los siguientes capítulos cuyos alcances se dan a continuación:

### CAPITULO PRIMERO

Mencionaremos los antecedentes y la importancia de la hidráulica subterránea, así como los objetivos de la Tesis.

## CAPITULO SEGUNDO

Se dan los conceptos básicos del estudio fundamental del tema de Tesis, facilitando así una mejor comprensión de los próximos capítulos.

## CAPITULO TERCERO

Descripción detallada de la preparación y ejecución de las pruebas de bombeo.

## CAPITULO CUARTO

Exposición de las teorías de diferentes autores que son aplicadas en el cálculo cuantitativo de los parámetros hidrogeológicos, como son: coeficiente de permeabilidad, -transmisibilidad y almacenamiento, que determinaran las características del acuífero y servirán para evaluar el comportamiento de éste y del pozo. La aplicación de las teorías será con datos proporcionados por la Subdirección de Geohidrología y Zonas Aridas de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (S.A.R.H.).

## CAPITULO QUINTO

En este último capítulo se dan las conclusiones y -recomendaciones sobre el tema desarrollado.

## CAPITULO II

### CONCEPTOS GENERALES

#### II-1. Introducción

El estudio de los recursos hidráulicos subterráneos se ha fortalecido por el desarrollo progresivo de las ciencias enfocadas a tal fin, y que a continuación se mencionan:

- Hidrología Subterránea como ciencia se ocupa de evaluar la presencia, disponibilidad y calidad del agua subterránea.
- Hidráulica Subterránea se ocupa del movimiento del agua ya sea éste natural o inducido, a través de la formación de rocas permeables.
- Geología Física estudia la constitución y propiedades de los materiales que componen la Tierra; su distribución a través del globo, los procesos que los formaron y alteraron, la manera que han sido transportados y distorsionados y, la naturaleza y evolución -- del paisaje.



- Geohidrología o Hidrogeología, esta conformada por los fundamentos básicos del conjunto de conocimientos esenciales que comprenden la Geología y la Hidrología. Recibe tal calificación, en atención a la preponderancia de apreciación, que tienen ambas materias de conocimiento, en sus objetivos prominentes de aplicación, como son la exploración y captación del agua subterránea y, su explotación.

Los estudios realizados son por lo general de tipo cuantitativos ya que son necesariamente parte integrante de la evaluación completa de la existencia y disponibilidad del agua, aunque muchas de las investigaciones que se realizan son de naturaleza cualitativa.

En este capítulo se hará mención de los más importantes conceptos generales y definiciones utilizados en la hidráulica de pozos, que nos permitiera comprender con mayor facilidad los temas que se desarrollaran posteriormente.

## II-2. El Ciclo Hidrológico

Aunque la hidrogeología se refiere exclusivamente al estudio del agua subterránea, es necesario el conocimiento del balance hidrológico en la región estudiada, debido a - que este nos proporciona las bases para determinar las --- pruebas de bombeo indispensables en la hidráulica de pozos; por tal motivo debemos tener información fundamental del - ciclo hidrológico del agua en sus términos más generales, ya que en el fondo las aguas subterráneas no representan - más que una parte del ciclo hidrológico total del agua.

El ciclo hidrológico es el proceso de circulación del agua en estado líquido, de vapor o sólido, desde los océanos a la atmósfera y de ella a la tierra, sobre la superficie o bajo el suelo para finalmente regresar al océano.

Una gran parte del agua que se precipita sobre la superficie de la tierra vuelve a la atmósfera en forma de vapor a través de la acción combinada de la evaporación, la transpiración y la sublimación, las cuales son, en esencia, tres variantes de un único proceso debido a la acción de - la energía solar, que es la que mantiene el ciclo hidrológico en marcha.

La evaporación es el proceso mediante el cuál las moléculas de agua de una superficie libre o de un suelo húmedo decido adquieren, mediante la radiación solar, la energía suficiente para escapar del estado líquido y pasar al estado gaseoso. La sublimación difiere del fenómeno de la evaporación solamente en que las moléculas de agua pasan directamente del estado sólido (nieve o hielo) al estado de ---

vapor, sin pasar por el estado líquido. La transpiración - es el proceso mediante el cuál las plantas ceden agua a la atmósfera.

El agua subterránea no alcanza nunca la atmósfera mediante un proceso de evaporación directa, a no ser que el nivel freático de las formaciones acuíferas esté situado a muy pocos decímetros de la superficie del suelo, y el suelo este altamente saturado de agua. El índice de evaporación directa puede aproximarse al de una superficie libre en el caso anterior; el consumo de las plantas constituye un medio de descarga del agua subterránea mucho más importante que la evaporación directa desde los acuíferos, ya que va a depender del tipo de vegetación que en ella existan, pudiéndose constituir como verdaderas bombas de agua.

Los cambios de presión y temperatura del aire, junto con los desplazamientos de las masas atmosféricas, originan los fenómenos de saturación de vapor de agua contenida en la atmósfera. Este vapor se condensa en forma de pequeñas gotas de agua, las cuales, se mantienen en el aire - debido a que la velocidad de caída correspondiente a su peso es prácticamente despreciable. Las nubes pueden considerarse como auténticas suspensiones coloidales de estas pequeñas partículas de agua condensada. El vapor de agua contenida en la atmósfera procedente de la evaporación sobre la superficie de los continentes y océanos se condensa y precipita a tierra en forma de lluvia, granizo o nieve elementos que constituyen las variadas formas de precipitación, que es la verdadera fuente de casi todas nuestras reservas

de agua dulce que caen sobre las áreas terrestres. De ella dependemos para renovar aquellas cantidades que se utilizan y que se toman de los lagos, corrientes superficiales y de los pozos que son destinados a innumerables usos humanos.

Parte de la precipitación, una vez que ésta ha humedecido el follaje y el terreno, escurre sobre la superficie de éste y llega hasta los ríos. Otra parte se infiltra dentro del suelo. Una buena parte del agua que penetra dentro del suelo, se detiene en la zona radicular de las plantas y eventualmente es devuelta a la superficie por estas mismas, o mediante el fenómeno de capilaridad. Sin embargo, otra parte percola por debajo de la zona radicular y mediante la influencia de la gravedad continúa su movimiento descendente hasta que llega al depósito subterráneo.

Una vez que se incorpora al depósito subterráneo, el agua que se ha percolado se desplaza a través de los poros de los materiales subterráneos y puede reaparecer en la superficie en aquellas zonas que se hallan a elevaciones inferiores al nivel de las que permitieron su incorporación al depósito. El agua subterránea descarga naturalmente en éstos sitios en forma de manantiales y percolación dispersa manteniendo así el caudal de estiaje de los ríos.

Los hechos más destacados del ciclo hidrológico del agua se muestran en la figura II-1.

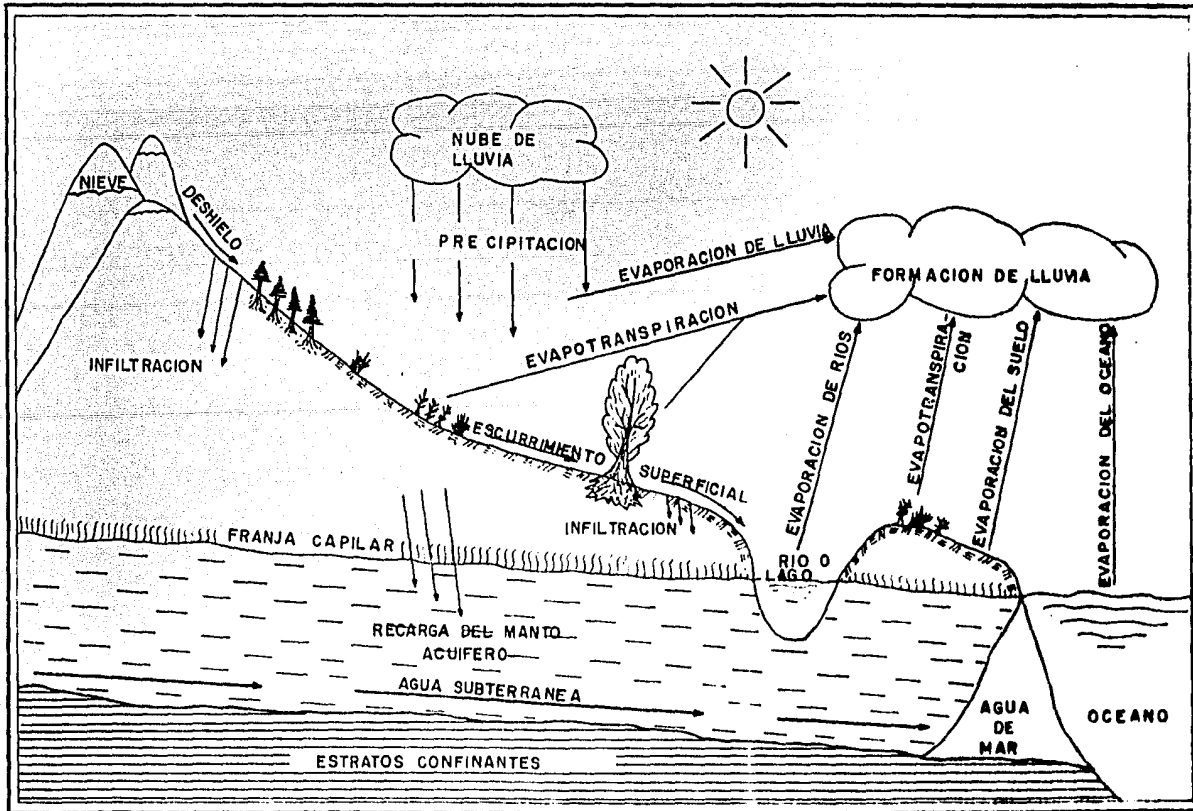


FIG. II-1 CICLO HIDROLOGICO

### 11-3. El Agua Subterránea

El término agua subterránea no se refiere a una agua cualquiera que se halle por debajo de la superficie del terreno. En general el agua que se infiltra en el suelo se denomina agua subsuperficial, pero no toda se convierte en agua subterránea; tres son los hechos fundamentales que tienen relación con esta agua:

- Primero, que puede ser devuelta a la superficie por fuerzas capilares y evaporada hacia la atmósfera, ahorrándose así gran parte de su recorrido dentro del ciclo hidrológico descrito.
- Segundo, que puede ser absorbida por las raíces de las plantas que crecen en el suelo, ingresando de nuevo a la atmósfera a través del proceso de la transpiración.
- Tercero, que la que se infiltra profundamente en el suelo, puede ser obligada a descender por la fuerza de la gravedad hasta que alcance el nivel de la zona de saturación que constituye el depósito de agua subterránea y que abastece de la misma a los pozos.

En cualquier lugar existe siempre alguna cantidad de agua por debajo de la superficie del terreno. Sin embargo, el localizar agua subterránea significa establecer dónde ésta tiene lugar en condiciones tales que permitan su rápido acceso a un pozo para que realmente sea de utilidad. Las maneras prácticas de conseguir lo anterior, incluyen la

la aplicación de conocimientos científicos, experiencia en perforación de pozos y sentido común. No olvidando factores que influyen en su explotación como son:

- Accesibilidad
- Confiabilidad
- Calidad
- Costo de explotación

Es preciso mencionar finalmente que para una buena explotación del agua subterránea como recurso natural, se ha ce necesario conocer las condiciones estructurales del sub suelo y los diversos factores que determinan la manifestación y el movimiento del agua dentro de las formaciones -- geológicas.

#### II-4. Distribución Subsuperficial del Agua

Para comprender las manifestaciones del agua subterránea, es preciso estudiar la distribución vertical de ésta dentro de los materiales geológicos subsuperficiales o formaciones.

Las aguas naturales existentes en la superficie del suelo están sometidas al peso de la gravedad. Se infiltran, a través de los poros, las pequeñas fisuras y todas las soluciones de continuidad que abundan en el suelo y en rocas subyacentes por muy profundas que éstas se encuentren. Así, entre las rocas acaban por llenarse de agua, el nivel asciende en razón de las infiltraciones, mientras que encima, al contrario, están normalmente vacíos. Por tal razón, se puede distinguir dos zonas diferentes en que se divide el subsuelo.

1. Zona de Aereación. Es el estrato superior, en donde las aberturas o poros están sólo parcialmente llenos de agua. Esta zona se divide en tres franjas, las cuales varían en profundidad y sus límites no están definidos exactamente mediante diferencias físicas de los materiales geológicos y solamente existe una gradual transición de una a otra.

1-a. Franja de humedad del suelo. La franja de agua contenida en el suelo tiene particular importancia para la agricultura puesto que es la que suministra el agua necesaria para el crecimiento de las plantas. El agua utilizada



por las plantas y contenida en la franja de humedad del -- suelo, es retenida en ésta mediante atracción molecular y la acción capilar contra la fuerza de la gravedad. Solamente cuando una cantidad suficiente de agua ha entrado a esta franja como para satisfacer la capacidad de retención de las fuerzas capilares, es que el agua empieza a percolar - hacia abajo bajo la fuerza de la gravedad.

1-b. Franja Intermedia. El agua que pasa a través de la capa de humedad del suelo llega a la franja intermedia y continúa su descenso por acción gravitacional. Al igual que en la franja de humedad del suelo, la franja intermedia retiene agua suspendida por la atracción molecular y capilaridad. El agua suspendida en esta constituye un almacenamiento fósil, puesto que no se puede recuperar para utilizarla. Su utilidad consiste únicamente en proveer al agua proveniente de la franja de humedad del suelo, un pasaje hacia la franja capilar y a la zona de saturación situada inmediatamente por debajo de aquélla.

1-c. Franja Capilar. esta franja yace inmediatamente por debajo de la intermedia y encima de la zona de saturación. Retiene agua sobre esta última mediante fuerza capilar contrarrestando la acción de la gravedad. Su espesor y la cantidad de agua que retiene depende del tipo de material. En algunos materiales tales como limo y arcilla, la franja capilar alcanza a veces espesores de hasta 2.5 m, - en tanto que en arenas gruesas y en grava llega a ser de una fracción de centímetro.

2. Zona de Saturación. Se encuentra inmediatamente por debajo de la zona de aereación y en donde sus intersticios se encuentran totalmente saturados de agua. El agua contenida en la zona de saturación es la única parte de toda el agua del subsuelo de la cual se puede hablar con propiedad como agua subterránea. La zona de saturación podría asimilarse a un gran embalse natural o sistemas de embalses cuya capacidad total es equivalente al volumen del conjunto de poros de las rocas que se hallan llenos de agua.

El espesor de la zona de saturación varía desde unos pocos de metros hasta varios cientos, algunos de los factores que determinan su espesor son:

- 1). La geología local
- 2). La presencia de intersticios en las formaciones.
- 3). La recarga y el movimiento o desplazamiento del agua desde las áreas de éstas hasta las de descarga.

En la figura II-2 se puede visualizar con detalle las zonas y franjas descritas anteriormente.

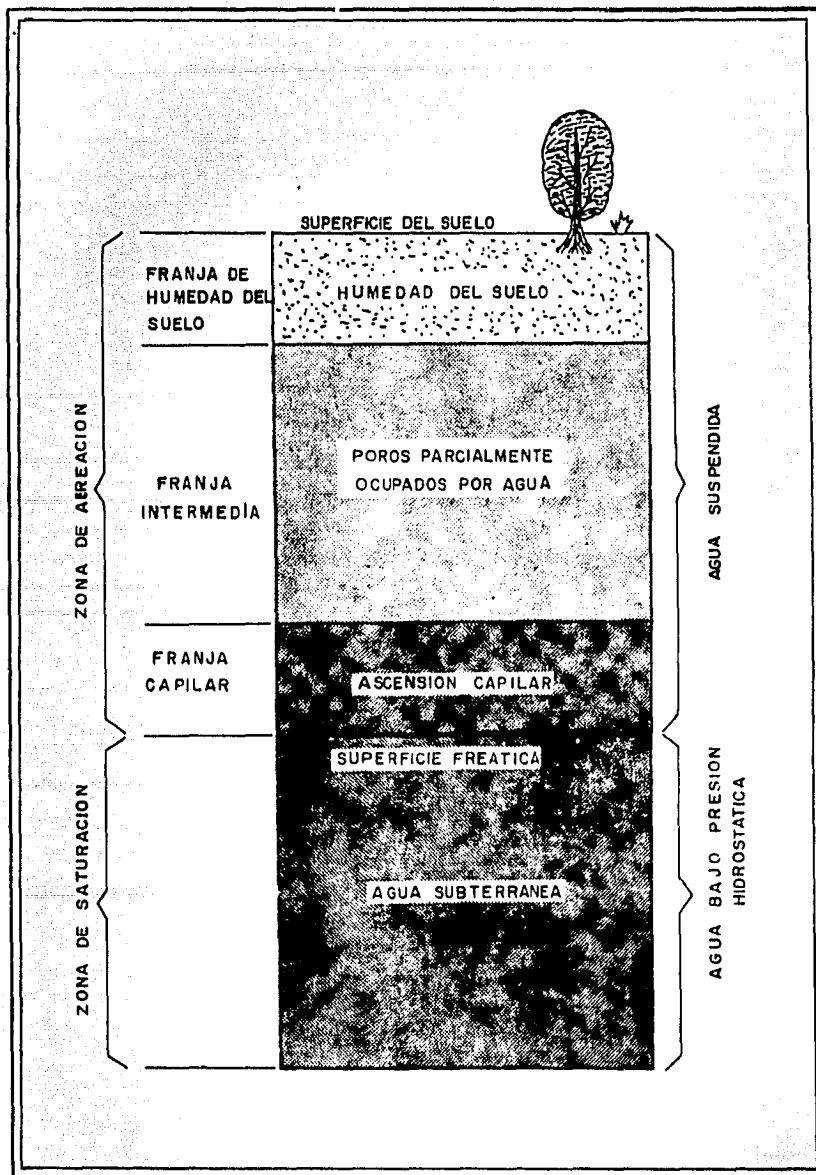


FIG. II-2 DISTRIBUCION SUBSUPERFICIAL DEL AGUA

## II-5. Los Acuíferos o Embalses Subterráneos

### II-5.1 Definiciones Generales

1-a. Acuífero. Es toda formación o grupo de formaciones geológicas comprendidas dentro de la zona de saturación de las que pueden ser extraídas cantidades significativas de agua. El valor de un acuífero como fuente potencial de suministro de agua depende principalmente de dos características que le son intrínsecas: su capacidad para almacenarla y su aptitud para transmitirla.

1-b. Acuicludo. Es una formación impermeable que, aunque porosa y con sus poros intercomunicados, no es capaz de proporcionar cantidades aprovechables de agua por ningún procedimiento práctico y económico. Dentro de este grupo se encuentran las arcillas masivas de baja permeabilidad, que hidrogeológicamente no son aptas para la construcción de captaciones de aguas subterráneas.

1-c. Acuitardo. Son las formaciones geológicas que, con teniendo apreciables cantidades de agua la trasmite muy lentamente por lo que tampoco son aptos para el emplazamiento de captaciones, pero sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos, que puede llegar a ser muy importante en ciertos casos.

1-d. Acuífugo. Son todas las formaciones impermeables que no son capaces de almacenar ni transmitir agua; la roca sana es un ejemplo típico.

## II-5.2 Tipos de Acuíferos

Desde el punto de vista del aprovechamiento del agua subterránea, nos interesan directamente, como es natural, los acuíferos. Existen diferentes tipos de acuíferos y que a continuación se discutirán los más importantes en relación con la figura II-3

2-a. Acuífero confinado o artesiano. Es aquel en el cual el agua del subsuelo está confinada a presión, entre estratos impermeables o semipermeables, de tal manera que el nivel piezométrico correspondiente al estrato está a nivel superior que la frontera más alta del mismo, por lo que si se abre un pozo, el agua subirá por encima de esa frontera; pudiéndose alcanzar o no el nivel del terreno y según ello suceda se tendrá un pozo artesiano brotante o no brotante. El agua en un pozo artesiano marca el nivel de las presiones hidrostáticas en el acuífero en el sitio que se abrió el pozo; la superficie imaginaria definida por esos niveles es la superficie piezométrica del acuífero artesiano. Las elevaciones o descensos del nivel del agua dentro de un pozo artesiano se deben más a cambios de presión en el acuífero que a cambios en el volumen del almacenamiento.

2-b. Acuífero libre o no confinado. Es aquel en que la superficie superior de la zona de saturación está a presión atmosférica; esta superficie es el nivel freático. El agua en un pozo realizado en un acuífero libre se eleva, como es natural, sólo hasta el nivel freático únicamente. En

el caso de acuíferos libres, las elevaciones o descensos - del nivel freático corresponden a cambios en el volumen de almacenamiento y no a cambios de presión en el agua.

2-c. Acuíferos Colgantes. Es un caso especial de los acuíferos libres, en los que la masa de agua subterránea - es soportada por un estrato impermeable o semipermeable -- situado sobre el nivel freático medio de la zona.

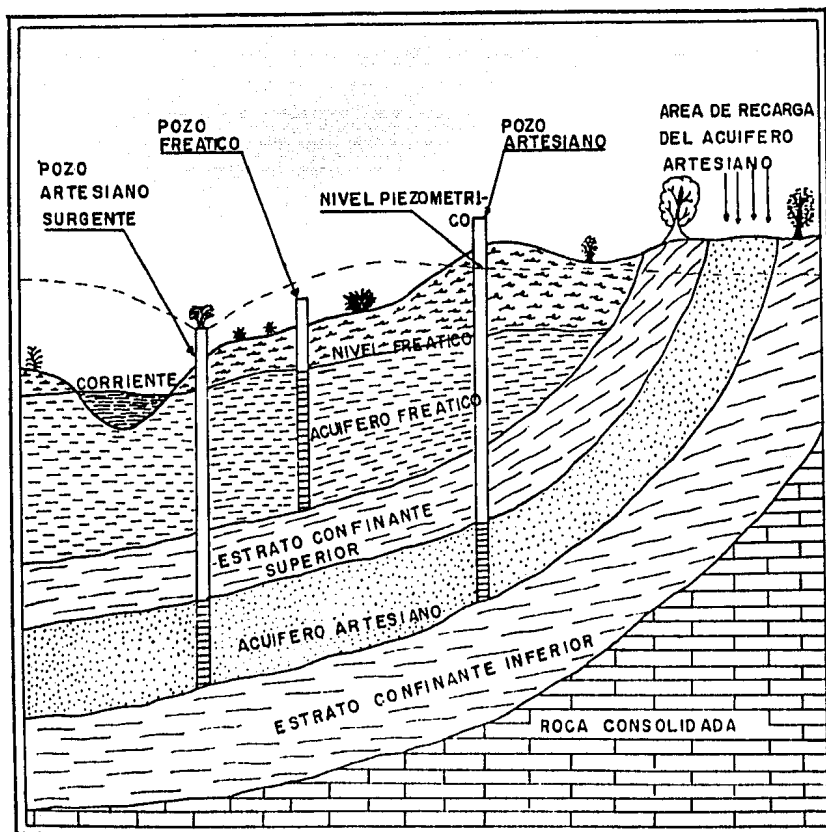


FIG. II-3 TIPOS DE ACUÍFEROS Y POZOS.

## II-6. Nociones Hidrológicas de las Rocas

El marco donde se presentan los acuíferos lo condiciona los materiales que lo constituyen como es el caso de rocas y suelos, lo que hace necesario tener conocimientos - cuando menos generales de geología y por tal motivo a continuación se desarrollan.

### II-6.1 Definiciones

Rocas Igneas. En principio, estas rocas fueron, una masa fundida, semejante a un líquido caliente, que recibe el nombre de magma, y que, al enfriarse, se convierte en una roca dura y firme.

Rocas Sedimentarias. Son rocas constituidas de partículas las derivadas de la desintegración de rocas preexistentes. Por lo general, estas partículas son transportadas por el agua, el viento o el hielo a los lugares donde se depositan según nuevos acoplamientos, donde posteriormente se consolidan.

Rocas Metamórficas. Son las rocas que han sufrido modificaciones en el estado sólido como consecuencia de intensos cambios en la temperatura, presión y ambiente químico, transformándose así de una roca originalmente ígnea o sedimentaria a metamórfica.

Para dar una idea aproximada de esta selección desde el punto de vista litológico, se presenta la siguiente figura II-4 en la que se muestran algunos de los tipos de rocas más comunes en nuestro país.

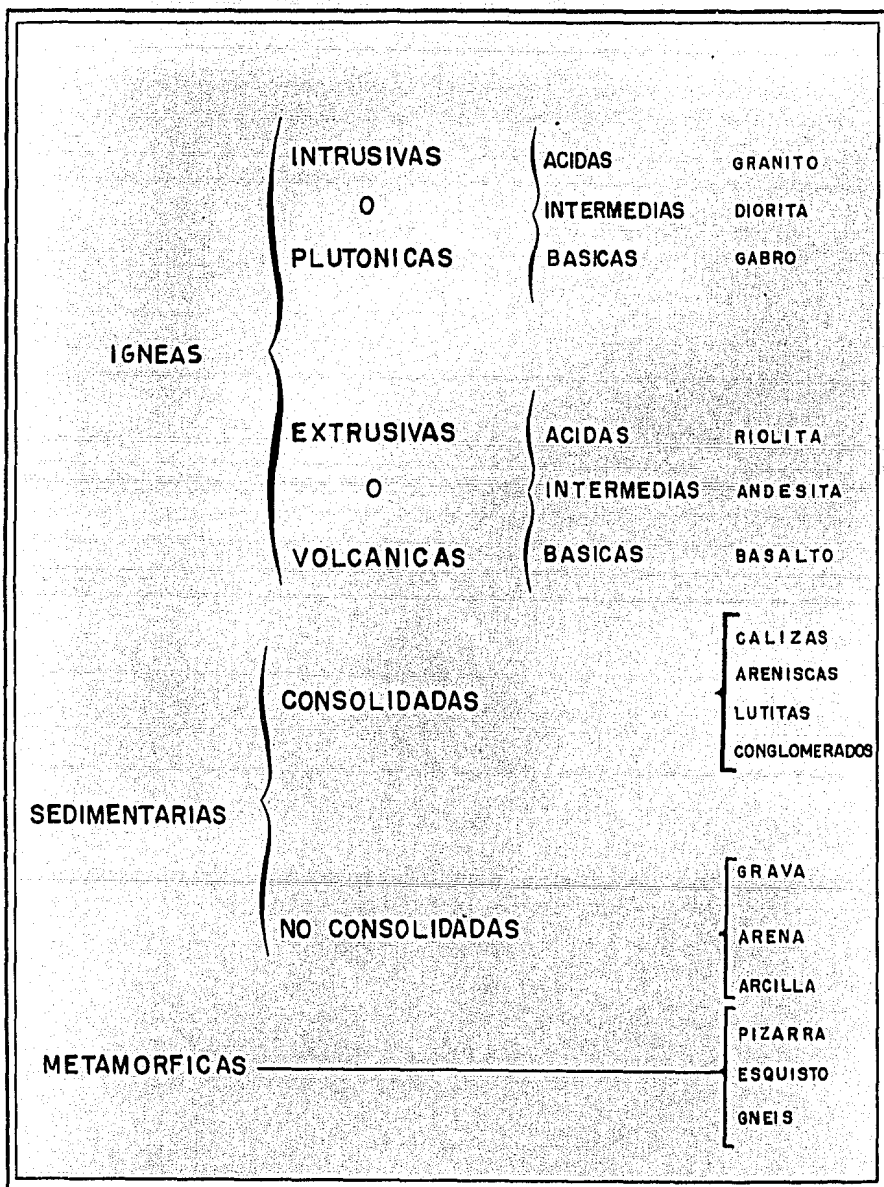


FIG. II-4 CLASIFICACION DE ROCAS



## II-6.2 Porosidad y Permeabilidad de las Rocas

### 2-a. Rocas ígneas y metamórficas

Las rocas ígneas y metamórficas presentan una porosidad entre 1 y 3 por ciento, debido a que sus escasos poros que poseen son muy pequeños y por lo general carecen de conexión entre sí; en consecuencia, las permeabilidades son tan pequeñas que pueden ser consideradas en la mayoría de las rocas como nulas desde el punto de vista práctico. Sin embargo, por su fracturamiento y zonas descompuestas puede desarrollarse una considerable porosidad y permeabilidad.

La permeabilidad y porosidad de estas rocas disminuye de modo general a medida que la profundidad aumenta. Esta disminución se debe a un doble hecho:

- 1). Al peso de las rocas suprayacentes.
- 2). A la limitación que en la profundidad alcanzan - los efectos que producen la alteración meteórica y la descomposición de las rocas, como son:
  - a). Los deslizamientos
  - b). Los asentamientos
  - c). La erosión superficial
  - d). La descomposición química
  - e). Las raíces de las plantas
  - d). La acción del hielo

## 2-b. Rocas sedimentarias

### - Las rocas detríticas de grano fino

La mayor parte de las rocas detríticas de grano fino poseen porosidades relativamente elevadas, pero muy bajas permeabilidades. Sin embargo, en algunas en general y en la mayor parte de las argelitas, se suelen desarrollar fracturas, muy próximas entre sí y en algunas ocasiones pueden estar afectadas por un sistema de fallas; estas grietas y fracturas pueden proporcionar a los pozos caudales de algunas décimas de litro por segundo. Pero en realidad, lo más frecuente es que las rocas sedimentarias de grano fino constituyan barreras frente al movimiento del agua. En las zonas donde los estratos son casi horizontales, las rocas de grano fino suelen actuar como amplios niveles confinantes de los sistemas artesianos.

El gran volumen que ocupan los espacios porosos de la mayor parte de las rocas sedimentarias de grano fino permite almacenar grandes cantidades de agua. Aunque los pozos, en la mayor parte de estas rocas, no pueden extraer directamente cantidades significativas de esa agua almacenada, a veces suele ser posible, gracias a los pozos, provocar un lento drenaje hacia los acuíferos confinados, convirtiéndose en un área de recarga para estos acuíferos.

### - Las areniscas

La porosidad total de las areniscas suele variar entre un 5 y 30 por ciento. El volumen de huecos en este tipo de rocas está en función de la clasificación más o menos homogénea de los granos que la componen, de su forma geomé-

trica, del tipo de empaquetado y del grado de cementación. De todas estas variables, la más importante es la cementación; el cemento más común suele ser la calcita, la arcilla, la dolomita y el cuarzo. Algunas veces la diferencia de permeabilidad entre unas arenas y las correspondientes areniscas es debida a una mayor compactación de los granos en la roca, pero en la mayoría de las veces se debe fundamentalmente a la reducción del espacio poroso por la presencia del cemento.

- Las rocas carbonatadas

Los cambios más importantes de la porosidad y de la permeabilidad suelen ser debidos a los procesos de compactación, de disolución del aragonito y de la calcita, precipitación de cemento calizo y formación de mineralización de dolomita. La porosidad primaria de una roca en su conjunto puede ser, sin embargo, muy significativo, ya que proporciona el espacio para el almacenamiento de las aguas subterráneas que podrán ser cedidas lentamente a otras zonas de mayor permeabilidad.

## II-6.3 Caudales

### 3-a. Rocas ígneas y metamórficas

En general, los pozos excavados en rocas ígneas y metamórficas los caudales de explotación son más bien bajos, aunque en casos de rocas fracturadas no. Podemos decir, que el caudal medio de explotación de los pozos abiertos esta comprendido, según las regiones, entre 0.5 y 1.5 lts/seg.

Siendo los factores siguientes los que determinan los caudales

- a).- La textura de las rocas.
- b).- La disolución de los minerales debido a la circulación del agua subterránea, provocando el aumento de la porosidad y permeabilidad.
- c).- Aumento del caudal en las regiones de clima húmedo.
- d).- La topografía de las regiones de rocas ígneas y metamórficas, es un factor muy importante, ya que, los pozos emplazados en las regiones del altiplanicie y en el fondo de los valles suelen proporcionar más caudal, que los pozos ubicados sobre las laderas de los valles o en las crestas de las colinas.
- e).- Los caudales de los pozos están también afectados por el tipo de diseño y acabado del pozo.

### 3-b. Rocas sedimentarias

Por lo general, las rocas sedimentarias se originan en ambiente marino o en contacto con agua, siendo las mejores transmisoras de agua, aunque todo depende de su grado de compactamiento. La mayor parte de los pozos abiertos en rocas sedimentarias moderadamente compactas poseen caudales comprendidos entre 0.05 y 30 lts/seg. Las rocas de grano muy fino, por lo general, sólo permiten alumbrar caudales inferiores a 0.5 l/seg. Las areniscas proporcionan caudales

normalmente comprendidos entre 0.5 y 15 lts/seg. Y las calizas, frecuentemente sitúan sus caudales entre 0.5 y 1.5 lts/seg.

Los caudales de un pozo pueden ser mejorados mediante ciertas operaciones, llamadas de desarrollo y que son las siguientes:

- Se emplean explosivos para la fracturación de rocas.
- Se inyectan fluidos a presiones elevadas
- Se basan en la utilización de ácidos para la disolución de las paredes de las fisuras de las rocas carbonatadas.

## II-6.4 Calidad del Agua

### 4-a. Rocas ígneas y metamórficas

La calidad química del agua procedente de las rocas ígneas y metamórficas suele ser casi siempre excelente. Se encuentran excepciones en el caso de regiones áridas donde las aguas pueden haberse concentrado en sales por efecto - de una intensa evaporación y en los lugares donde el agua congénita y oceánica ha emigrado hacia el interior de las fracturas de las rocas.

La contaminación biológica del agua subterránea suele llegar a constituir un problema allí donde el suelo que recubre las formaciones acuíferas tiene poco espesor o esta ausente.

#### 4-b. Rocas sedimentarias

La composición química de las aguas subterráneas que son extraídas de las rocas sedimentarias pueden variar desde la correspondiente salmuera de las rocas marinas profundas hasta las aguas que poseen muy pocos sólidos disueltos. Si consideramos el agua subterránea almacenada en el conjunto de todas las rocas sedimentarias, las aguas salinas y las salmueras son más abundantes que las aguas dulces. Afortunadamente, sin embargo, el agua dulce se encuentra generalmente más cerca de la superficie del suelo que las aguas saladas.

## II-7. Nociones Hidrológicas de los depósitos no consolidados.

### II-7.1 Introducción

La prospección de las aguas subterráneas de una región suele empezarse generalmente por el reconocimiento de los terrenos no consolidados. Esta preferencia está fundada en las siguientes razones básicas:

1). Los terrenos formados por depósitos no consolidados se perforan y excavan con mayor facilidad, por lo que su exploración mecánica suele ser rápida y poco costosa.

2). Estos terrenos por lo general rellenan el fondo de los valles, donde los niveles freáticos suelen estar - muy próximos a la superficie y donde, en consecuencia, las alturas de elevación mediante bombeo será mínima.

3). Estas regiones poseen un coeficiente de almacenamiento superior al de los restantes materiales geológicos.

4). Los depósitos no consolidados se encuentran en - una posición hidrogeológica altamente favorable para su recarga natural a partir de lagos y ríos.

5). Las permeabilidades en los depósitos no consolidados, a excepción de las arcillas que son prácticamente - impermeables, son por lo general más elevadas que los restantes terrenos, si se exceptúan algunas rocas volcánicas recientes y algunas calizas carstificadas.

## II-7.2 Características generales

### 2-a. Los valles fluviales

La distribución de arcillas, limos, arenas y gravas en el interior de las formaciones fluviales es extraordinariamente compleja en su detalle. Los patrones generales de distribución de estos depósitos son, sin embargo, perfectamente regulares y predecibles.

A pesar de los importantes cambios laterales de facies que pueden existir en los depósitos aluviales que colmatan el fondo de los valles, la mayor parte de estos depósitos - presentan una secuencia vertical bastante sencilla que puede ir de arenas gruesas y gravas, en el fondo de los paleocanales o cerca de ellos, hasta los limos y arcillas de la parte superior. El espesor relativo de cada formación de material grueso y fino depende de la naturaleza de los sedimentos y de la historia geológica en cada punto. Los depósitos fluvioglaciares que rellenan el fondo de algunos valles de montaña poseen por lo general menos cantidad de materiales finos en la parte superior de la formación. Los depósitos de la mayor parte de los ríos aumentan de espesor al aproximarse a la costa, debido a que allí rellenan los antiguos valles que fueron considerablemente reprofundizados como consecuencia de los más importantes descensos del nivel del mar que tuvieron lugar durante las glaciaciones pleistocenas.

Los depósitos más gruesos, que son los que dan lugar a los mejores acuíferos, están constituidos por arenas y gravas que han sido, primeramente, arrastradas por la co--



rrientes de los ríos y posteriormente depositadas y acumuladas bajo sus aguas en los mismos cauces.

#### 2-b. Los valles de origen tectónico

Los grandes valles generalmente deben su origen más a los movimientos tectónicos que a la erosión de los ríos. Algunos de estos valles están limitados lateralmente por largos sistemas de fallas.

El fondo de los grandes valles se suele encontrar parcialmente rellenado por las aportaciones de los ríos que depositaron cantidades ingentes de material detríticos procedente de la erosión de las montañas circundantes. Otros tipos de depósitos, tales como los materiales lacustres, piroclásticos, eólicos e incluso glaciares, pueden ser, sin embargo, más importantes que los depósitos aluviales, según la historia geológica de cada región.

#### 2-c. Las llanuras costeras

La extensión de las llanuras costeras varía desde las que constituyen los depósitos de los valles aislados que desembocan en el mar y pasan lateralmente, en la dirección de tierra adentro, hasta las extensas y monótonas llanuras costeras que bordean a lo largo de las costas de los océanos.

Algunas unidades estratigráficas de las llanuras costeras están constituidas por depósitos aluviales que pasan lateralmente, en la dirección del mar, a unidades enteramente marinas. Esta disposición se hace evidente al cons-

tatar las sucesivas tendencias de los sedimentos a ser cada vez más finos a medida que se aproximan al mar.

#### 2-d. Las regiones de depósitos eólicos

Los depósitos eólicos son mucho menos extensos que los depósitos aluviales o glaciares. Es difícil llegar a la evaluación del volumen de los materiales eólicos encontrados en las perforaciones de prospección geológica, debido a que la textura y características estructurales particulares de estos depósitos raramente son reconocibles a partir de los datos que ofrecen los testigos de las perforaciones.

Los depósitos eólicos se pueden dividir en dos tipos: los loess y las arenas de duna. La arena de duna está constituida por una mezcla muy homogénea de granos cuyo tamaño varía desde 0.05 a 0.5mm. Los loess están constituidos por un material del tamaño del limo que, al igual que la arena de duna, está también bien clasificada.

#### 2-e. Las regiones glaciares

Aproximadamente el 30 por ciento de la extensión de los continentes de la Tierra estuvo cubierta por los hielos glaciares en el último millón de años. Actualmente, un 10 por ciento de la extensión de los continentes permanece todavía cubierta por los hielos.

En las formaciones y acarrees glaciares pueden distinguirse dos tipos fundamentales de depósitos:

- 1). Los depósitos constituidos por materiales mal ---

clasificados, depositados directamente por la fusión de la masa glaciaria, llamados también tills.

2). Los depósitos constituidos por materiales que fueron bien clasificados bajo la acción de los cursos de agua.

## II-7.3 Porosidad y Permeabilidad

### 3-a. Los valles fluviales

Los limos y arcillas débilmente compactas poseen --- ciertas permeabilidades que varían de milímetros a decímetros por día. Una parte de esta permeabilidad se explica --- partiendo de una estructura abierta de las partículas elementales que constituyen estos finos depósitos, sin embargo, su elevada permeabilidad se debe a la presencia de estructuras secundarias, tales como los moldes dejados por las raíces, las madrigueras de los gusanos terrícolas y las grietas de desecación. Cuando se conoce el tamaño de las --- partículas de los depósitos aluviales se puede estimar la permeabilidad de estas formaciones, lo que podrá ser de -- utilidad para ciertos fines.

### 3-b. Los valles de origen tectónico

Las características acuíferas de los sedimentos que rellenan el fondo de los grandes valles son completamente similares a los de los valles más reducidos, a excepción --- del hecho de que los materiales de grano fino son más abundantes en los grandes valles y de que los materiales finos que quedaron sepultados a cierta profundidad tienden a ---

poseer una porosidad menor debido al fenómeno de la compactación por el peso que soportan de los sedimentos suprayacentes. En general, las zonas de los grandes valles poseen permeabilidades comprendidas entre 10 y 100 m/día; las zonas de limos y arcillas tienen una permeabilidad inferior de 0.1 m/día. La porosidad total puede estar generalmente comprendida entre el 25 y 60 por ciento.

### 3-c. Las llanuras costeras

Las propiedades acuíferas de los sedimentos que forman el subsuelo de las llanuras costeras son, en general, completamente semejantes a las de los sedimentos que rellenan el fondo de los grandes valles. Las permeabilidades de los niveles acuíferos varían entre 1 y 100 m/día, mientras que las de los niveles de limos y arcilla son de 0.01 m/día o inferiores.

### 3-d. Las regiones de depósitos eólicos

La arena de duna es el material que posee las propiedades hidrogeológicas más uniformes de todos los materiales acuíferos. Su porosidad total se sitúa entre el 35 y 40 -- por ciento, y su permeabilidad entre el 5 y 50 m/día.

Los loess poseen porosidades totales comprendidas entre el 40 y 50 por ciento. Estas porosidades elevadas son posibles gracias a que las partículas aisladas de limos, forman estructuras abiertas debido a la acción cementante de las pequeñas cantidades de arcilla, siempre presentes en los loess. La permeabilidad de estos depósitos varía --

dentro de una gama de valores que va de 0.1 mm/día hasta un máximo aproximado de 1 m/día.

### 3-e. Las regiones glaciares

El carácter heterogéneo de la granulometría de los tills, junto con la acción compactante de los hielos glaciares, hace que el tills resulte un material más bien compacto e impermeable. La mayor parte de los valores de la porosidad total están comprendidos entre el 25 y 40 por ciento. Los valores de la permeabilidad fluctúan entre el 0.014 y 42 mm/día.

## II-7.4 Caudales

### 4-a. Los valles fluviales

Casi todos los depósitos aluviales que se originan a partir de los grandes cursos de agua de régimen permanente permiten obtener caudales mínimos comprendidos entre 0.5 y 3 lts/seg.

### 4-b. Los valles de origen tectónico

Los pozos abiertos en los depósitos de los grandes valles profundos proporcionan generalmente caudales comprendidos entre 20 y 200 lts/seg.

### 4-c. Las llanuras costeras

Los caudales de los grandes pozos de agua subterránea para fines agrícolas, industriales o de abastecimiento a -

poblaciones, puede estar comprendidos entre 10 y 200 l/seg, que es muy aproximado al mismo caudal que los pozos de los grandes valles.

## II-7.5 Calidad del Agua

### 5-a. Los valles fluviales

La calidad química del agua de la mayoría de los depósitos aluviales suele ser buena. La composición del agua, esta determinada por el tipo de vegetación local, por los cultivos y por la naturaleza litológica de las rocas que forman las laderas del valle y de los sedimentos que rellenan su fondo. La contaminación, por organismos patógenos, de los pozos emplazados en las formaciones aluviales puede ser un hecho raro.

### 5-b. Los valles de origen tectónico

El agua subterránea de los grandes valles de origen tectónico es muy variable en sus características químicas. El agua salada procedente de antiguas aguas marinas o de la disolución de evaporitas, puede estar presente en los acuíferos bastante profundos o incluso cercanos a la superficie y en las partes centrales de las cuencas anteriores. Es probable que el agua de mejor calidad química se encuentre en el interior de los sedimentos de valles que tuvieron un buen drenaje exterior a lo largo de toda su historia geológica. La contaminación biológica rara vez suele ser un problema en los pozos situados en el interior de los valles.

#### 5-c. Las llanuras costeras

Las aguas subterráneas de las llanuras costeras tienen el problema de poseer gran cantidad de sólidos disueltos, además por encontrarse cerca del mar, muchas de sus aguas suelen ser de origen salobre.

#### 5-d. Las regiones de depósitos edólicos

Las dunas activas están por lo general compuestas de minerales limpios, relativamente inertes, que causan solamente modificaciones menores en la composición química del agua infiltrada. En cambio, el agua de los loess se encuentra más mineralizada que el agua de las dunas.

#### 5-e. Las regiones glaciares

La calidad química del agua subterránea procedente de los depósitos glaciares sometidos a una activa circulación subterránea es generalmente buena. En las regiones -- donde el agua subterránea está prácticamente estancada, puede contener tal cantidad de material sólido disuelto que -- deje incluso de ser potable, sobre todo en las regiones -- donde el agua subterránea que fluye hacia arriba, desde el basamento de rocas marinas a los depósitos glaciares, es -- salada; aunque en el país es poco representativa.

## II-8. Definición de términos empleados en las pruebas de bombeo de los pozos de agua

- Nivel Estático del Agua. Este es el nivel a que el agua permanece dentro de un pozo cuando no se está extrayendo agua del acuífero por bombeo o descarga libre. Generalmente se expresa como la distancia desde la superficie del terreno (o desde algún punto de referencia cercano a éste) hasta el nivel del agua en el pozo. En el caso de un pozo surgente el nivel estático se halla por encima de la superficie.

- Nivel Dinámico o de Bombeo. Este es el nivel en que se encuentra el agua dentro del pozo, conforme avanza el bombeo. En el caso de los pozos surgentes, es el nivel con el cual el agua fluye desde el pozo.

- Abatimiento. El abatimiento en un pozo significa el descenso que experimenta el nivel del agua cuando se está bombeando o cuando el agua fluye naturalmente. El abatimiento es la diferencia, medida en metros, entre el nivel estático y el nivel dinámico.

- Abatimiento Residual. Una vez que el bombeo se ha -- detenido, el nivel del agua asciende y trata de alcanzar - el mismo nivel existente antes de empezar el bombeo. Durante este período de recuperación, la distancia a que el agua se halla por debajo del nivel inicial estático recibe el - nombre de abatimiento residual.

- Radio de Influencia, R. Es la distancia desde el centro del pozo hasta el límite del cono de depresión.



- Cono de Depresión . Es la forma circular que adquiere la superficie del agua al desplazarse hacia el pozo de bombeo desde distancias lejanas.

La figura II-5, representa un pozo libre o freático, en el que se muestra el significado de los términos ya definidos.

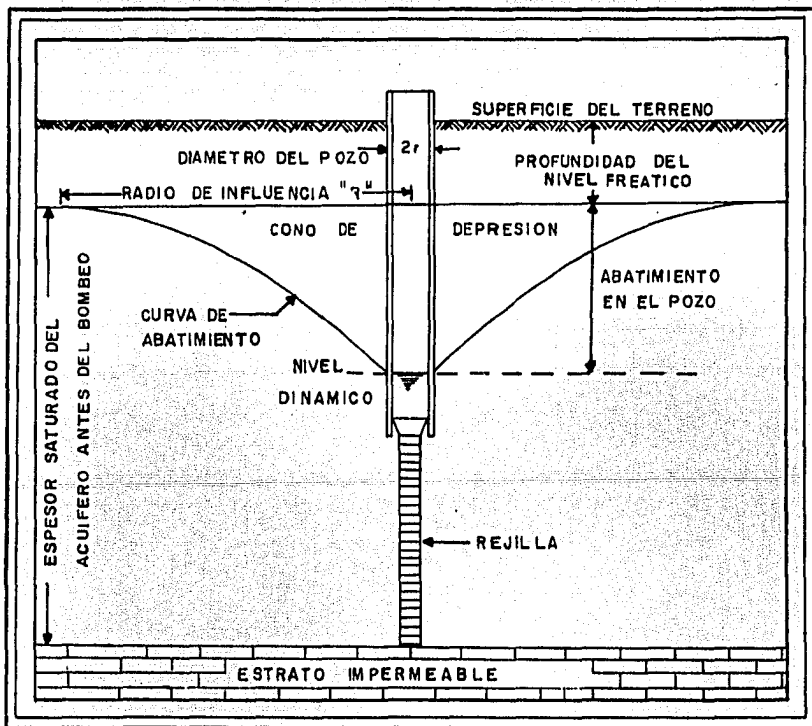


FIG. II-5 DIAGRAMA DE UN POZO EMPLAZADO EN UN ACUIFERO LIBRE

La figura II-6, representa un pozo emplazado en un -  
 acuífero confinado, que muestra el sentido de los términos  
 definidos anteriormente.

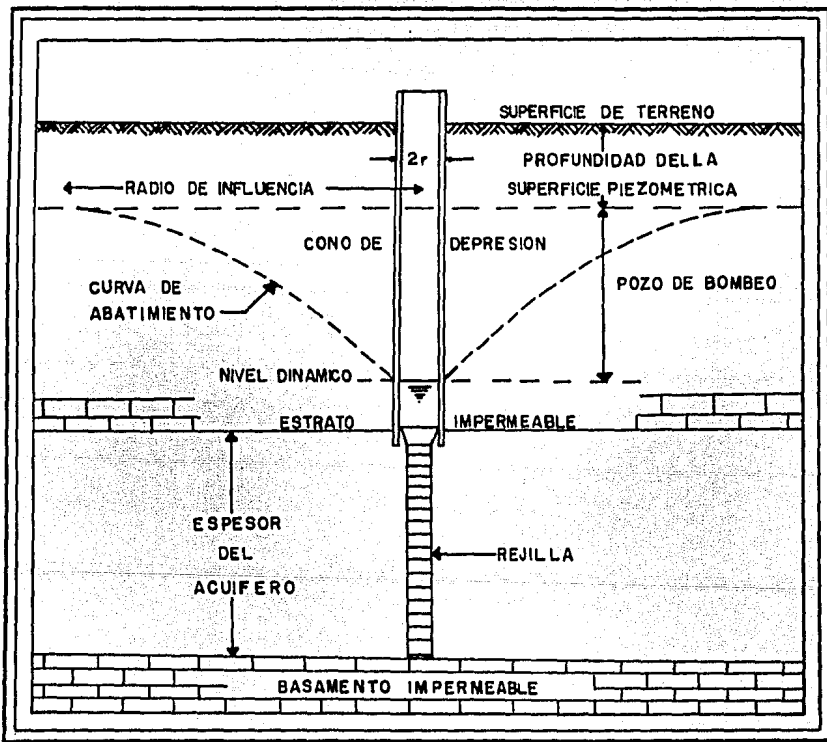


FIG. II-6 DIAGRAMA DE UN POZO EMPLAZADO EN UN ACUIFERO CONFINADO

## II-9. Propiedades hidrológicas de los materiales portadores de agua.

### II-9.1 Porosidad

Un medio poroso está formado por un agregado de granos entre los cuales existen espacios vacíos que pueden ser -- ocupados por un fluido; estos espacios vacíos se les conoce como poros o intersticios. La porosidad cuantitativamente puede expresarse como la relación entre el volumen intersticial y el volumen total; en consecuencia, el número que la define es una fracción decimal o un porcentaje. Por lo tanto se tiene:

$$\theta = \frac{v_i}{V} = \frac{v_w}{V} = \frac{V - v_m}{V} \quad [\text{Adimensional}]$$

en donde,

$\theta$  = porosidad, en fracción decimal o porcentaje

$v_i$  = volumen de intersticios, en  $L^3$

$V$  = volumen total, en  $L^3$

$v_w$  = volumen de agua (en muestra saturada), en  $L^3$

$v_m$  = volumen de partículas minerales, en  $L^3$

La porosidad también puede expresarse por:

$$\theta = \frac{P_m - P_d}{P_m} = 1 - \frac{P_d}{P_m} \quad [\text{Adimensional}]$$

en donde,

$P_m$  = densidad media de las partículas minerales  
(densidad de los granos).

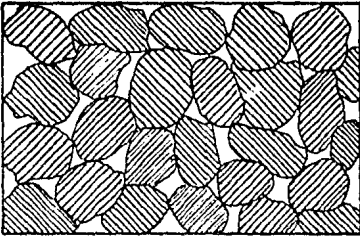
$P_d$  = densidad de la muestra seca (densidad glo--  
bal).

Naturalmente, el producto por cien del resultado numérico obtenido de las anteriores ecuaciones define el valor de -- la porosidad en porcentaje.

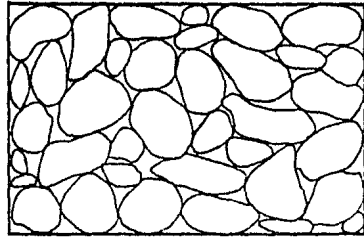
La porosidad primaria comprende los intersticios originales que quedaron al finalizar el proceso de formación de la roca o suelo. En las rocas sedimentarias y en los -- suelos los poros primarios son los espacios entre fragmentos y granos. En las rocas ígneas intrusivas los pocos poros primarios son el resultado del enfriamiento y cristali-- zación. En las rocas ígneas extrusivas, a causa de la ex-- pansion del gas ocluido, que pueden quedar grandes huecos; estos determinarán valores altos de porosidad, esten o no conectados. La porosidad primaria puede quedar reducida, o ser virtualmente nula, a consecuencia de fenómenos metamórficos.

La porosidad secundaria se presenta como el resultado de diversos tipos de fracturas; juntas, diaclasa y huecos en los contactos de capas estratificadas y equistosidades. En algunas rocas esta porosidad secundaria es el único medio que hace posible el transporte y almacenamiento del -- agua subterránea.

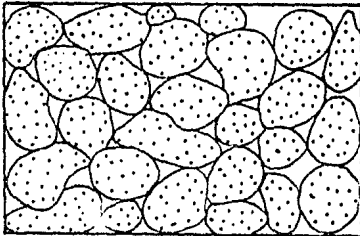
DISTINTOS TIPOS DE ROCAS INDICANDO LA RELACION  
ENTRE SU TEXTURA Y POROSIDAD



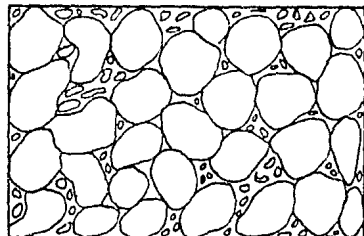
DEPOSITO SEDIMENTARIO DE  
GRANULOMETRIA HOMOGENA  
Y GRAN POROSIDAD.



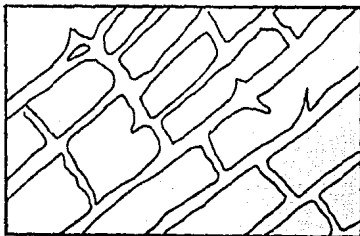
DEPOSITO SEDIMENTARIO DE  
GRANULOMETRIA HOMOGENA  
CUYA POROSIDAD HA DISMINUIDO  
POR CEMENTACION DE SUS INTER-  
TICOS CON MATERIALES MINERA-  
LES.



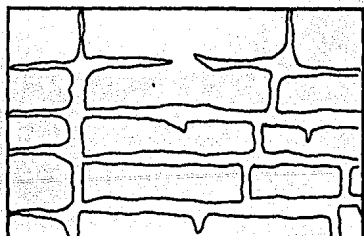
DEPOSITO SEDIMENTARIO DE  
GRANULOMETRIA HOMOGENA  
FORMADO POR ELEMENTOS QUE A  
SU VEZ SON POROSOS POR LO CUAL  
SU POROSIDAD ES MUY ELEVADA.



DEPOSITO SEDIMENTARIO DE  
GRANULOMETRIA HETEROGENEA Y  
ESCASA POROSIDAD.



ROCA POROSA POR FRAGMENTACION



ROCA POROSA POR DISOLUCION

## MATERIAL

## POROSIDAD TOTAL (%)

TIPO	DESCRIPCION	MEDIA	NORMAL		EXTRAORDINARIA	
			MAX.	MIN.	MAX.	MIN.
ROCAS MASIVAS	GRANITO	0.3	4	0.2	9	0.05
	CALIZA MASIVA	8	15	0.5	20	
	DOLOMITA	5	10	2		
ROCAS METAMORFICA		0.5	5	0.2		
ROCAS VOLCANICAS	PIROCLASTICOS Y TOBAS	30	50	10	60	5
	ESCORIAS	25	80	10		
	PUMITAS	85	90	50		
	BASALTOS DENSOS, FONOLITAS	2	5	0.1		
	BASALTOS VACUOLARES	12	30	5		
ROCAS SEDIMENTARIAS CONSOLIDADAS	PIZARRAS SEDIMENTARIAS	5	15	2	30	0.5
	ARENISCAS	15	25	3	30	0.5
	CRETA BLANDA	20	50	10		
	CALIZA DETRITICA	10	30	1.5		
ROCAS SEDIMENTARIAS SUELTAS	ALUVIONES	25	40	20	45	15
	DUNAS	35	40	30		
	GRAVAS	30	40	25	40	20
	LOESS	45	55	40		
	ARENAS	35	45	20		
	DEPOSITOS GLACIARES	25	35	15		
	LIMOS	40	50	35		
	ARCILLAS SIN COMPACTAR	45	60	40	85	30
	SUELOS SUPERIORES	50	60	30		

## II-9.2 Permeabilidad

La permeabilidad se define como la capacidad de un medio para transmitir agua, bajo un gradiente de potencial - hidráulico. En base a investigaciones se encontro que la - permeabilidad es aproximadamente proporcional al cuadrado del diámetro del grano medio\*, quedando expresado de la siguiente manera:

$$k \doteq C \cdot d^2 \quad [L^2]$$

en donde,

$k$  = permeabilidad intríntrica, en  $L^2$

$C$  = constante adimensional dependiente de la porosidad; del campo definido por los tamaños granulométricos extremos; de la distribución granulométrica y de la forma de los granos.

$d$  = diámetro del grano medio, en  $L$

La permeabilidad intríntrica viene a ser la cantidad - de agua que puede fluir a través de una sección transversal de área unitaria dentro de un material poroso, por unidad de tiempo y bajo un gradiente hidráulico de 1.00. La ecuación siguiente define la permeabilidad intríntrica:

$$k = \frac{q \cdot v}{g (dh/dl)} \quad [L^2]$$

\* Hidráulica Subterránea de S.W. Lohman

en donde,

$k$  = permeabilidad intrínseca, en  $L^2$

$q$  = caudal por área unitaria =  $Q/A$ , en  $L^3/T/L$

$\nu$  = viscosidad cinemática, en  $L^2 T^{-1}$

$g$  = aceleración gravitacional, en  $L T^{-2}$

$dh/dl$  = gradiente, o cambio unitario de carga hidráulica por unidad de longitud en la dirección del flujo.

Determinación de la permeabilidad intrínseca en el campo:

1). Ensayos de bombeo

En los ensayos de bombeo se determina en general el valor de la transmisibilidad  $T = K \cdot b$ , siendo  $b$  el espesor del acuífero. Los valores calculados de la transmisibilidad son valores promedios en un volumen de acuífero grande; si se conoce  $b$  con relativa precisión, se puede obtener valores de  $K$  muy aceptables. En general se obtiene la permeabilidad horizontal, pero puede estimarse la permeabilidad vertical con ensayos en pozos incompletos.

2). Ensayos de descenso en piezómetros

En sondeos, piezómetros y pozos, puede optarse por realizar ensayos de corta duración consistentes en la introducción o extracción de agua en cantidades pequeñas; -- observando como varían los niveles con el tiempo se tiene una forma de calcular la permeabilidad.



### II-9.3 Coeficiente de permeabilidad\*

Un medio determinado tiene un coeficiente de permeabilidad de longitud unitaria por unidad de tiempo si transmite en una unidad de tiempo un volumen unitario de agua - subterránea, a la viscosidad que esta se encuentre, a través de una sección de área unitaria normal a la dirección del flujo y bajo un gradiente de carga hidráulica unitaria. El coeficiente de permeabilidad es expresado de la siguiente manera:

$$K = - \frac{q}{dh/dl} \quad \left[ L \ T^{-1} \right]$$

en donde,

$K$  = coeficiente de permeabilidad, en  $L \ T^{-1}$

$q$  = caudal por área unitaria =  $Q/A$ , en  $L^3/T/L$

$dh/dl$  = gradiente, o cambio unitario de carga hidráulica por unidad de longitud en la dirección del flujo.

El signo menos indica que el movimiento del agua se produce en la dirección de la pérdida de carga. En el estudio del agua subterránea se considera el coeficiente de permeabilidad ( $K$ ) con medio totalmente saturado.

\* También se le conoce con el nombre de Conductividad --- Hidráulica.

## VALORES DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD EN TERRENOS NATURALES

CLASIFICACION GEOLOGICA	K en m/día
CALIZA ARCILLOSA	$8.3 \times 10^{-5}$
CALIZA	$2.2 \times 10^{-3}$
ARENISCA LIMOSA	$1.2 \times 10^{-1}$
ARENISCA DE GRANO GRUESO	$9.2 \times 10^{-1}$
ARENISCA	2.0
ARENA MUY FINA	8.3
ARENA DE GRANO MEDIO	$2.2 \times 10^2$
ARENA DE GRANO GRUESO	$2.6 \times 10^3$
GRAVA	$3.6 \times 10^4$
ARCILLA MONTMORILLONITICA <sup>1</sup>	$10^{-5}$
ARCILLA CAOLITICA <sup>1</sup>	$10^{-3}$

1. PARA LAS ARCILLAS SOLO SE INDICA EL ORDEN DE MAGNITUD.

#### II-9.4 Transmisibilidad

La transmisibilidad es el caudal de agua, a la viscosidad que ésta se encuentre, que pasa por unidad de anchura del acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario, en todo el espesor saturado. El valor de la transmisibilidad se obtiene a partir de la ecuación siguiente:

$$T = K \cdot b \quad \left[ L^2 T^{-1} \right]$$

en donde,

T = transmisibilidad, en  $L^2 T^{-1}$

K = coeficiente de permeabilidad, en  $LT^{-1}$

b = espesor del acuífero, en L

#### II-9.5 Rendimiento específico

En términos generales, el rendimiento específico está determinado por la parte de la cantidad de agua contenida en el material portador que es drenada por gravedad cuando el nivel freático desciende una unidad. Se expresa como el cociente entre el volumen de agua que el material saturado desaloja por gravedad y el volumen total de sólidos con sus intersticios saturados. Es decir:

$$S_y = \frac{V_g}{V} \quad \left[ \text{Adimensional} \right]$$

en donde,

$S_y$  = rendimiento específico, adimensional

$V_g$  = volumen de agua drenada por gravedad, en  $L^3$

$V$  = volumen total, en  $L^3$

El rendimiento específico es de gran importancia en los acuíferos libres.

## II-9.6 Capacidad de retención específica

La capacidad de retención específica de una roca o -- suelo se define como el cociente entre el volumen de agua que retiene el suelo saturado, en oposición al efecto de -- drenado por gravedad, y el volumen total. Es decir:

$$S_r = \frac{V_r}{V} = \theta - S_y \quad \left[ \text{Adimensional} \right]$$

en donde,

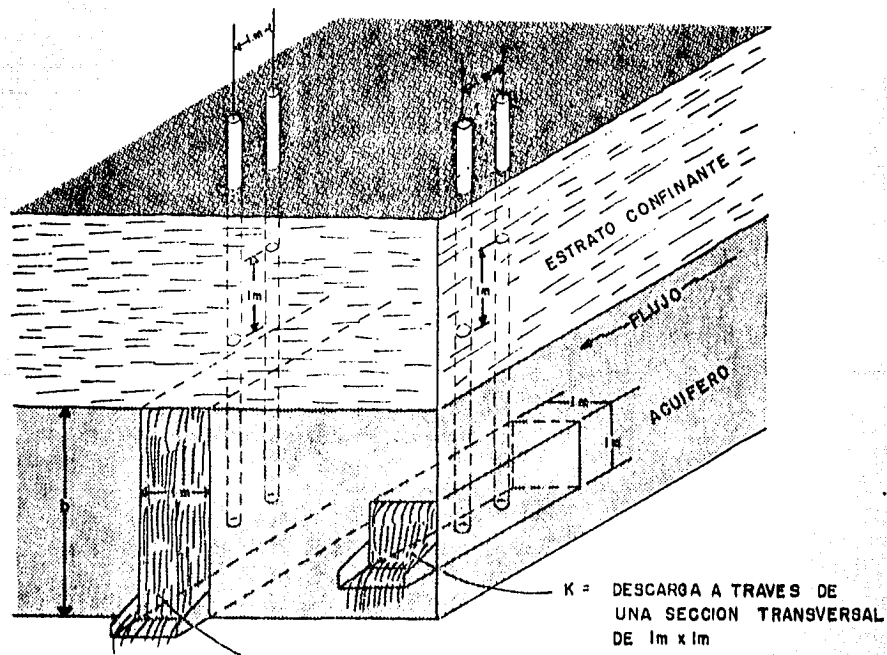
$S_r$  = capacidad de retención específica

$V_r$  = volumen de agua retenida en oposición al drenaje gravitatorio, principalmente a con secuencia de la atracción molecular

$\theta$  = porosidad efectiva, adimensional

$S_y$  = rendimiento específica, adimensional

CONCEPTOS GRAFICOS DE LOS COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD Y TRANSMISIBILIDAD



T = DESCARGA QUE TIENE LUGAR  
A TRAVES DE UNA UNIDAD  
DE ANCHO Y DEL ESPESOR  
DEL ACUIFERO, b.

## II-9.7 Coeficiente de Almacenamiento

La propiedad de almacenar agua que poseen los acuíferos confinados fue cuantificada por primera vez por Theis, al introducir el coeficiente de almacenamiento (S) en su ecuación:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_{r^2 S/4Tt}^{\infty} \left( \frac{e^{-u}}{u} \right) du$$

en donde,

s = descenso, en L

Q = caudal de bombeo constante, en  $L^3 T^{-1}$

T = transmisibilidad, en  $L^2 T^{-1}$

S = coeficiente de almacenamiento, adimensional

u = variable de integración

t = tiempo desde el comienzo del bombeo, en T

r = distancia desde el pozo de bombeo al punto donde se observa el descenso (s), en L

El coeficiente de almacenamiento se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero saturado si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o de carga hidráulica.

La compresibilidad del agua es muy reducida; por tanto, la cantidad de agua que puede liberar un acuífero confinado o semiconfinado depende fundamentalmente de la com-

presibilidad de su esqueleto sólido; mientras más compresible es el material mayor es la cantidad de agua que libera al compactarse.

En acuíferos confinados el coeficiente de almacenamiento es igual a:

$$S = S_s \cdot b + S_y \quad \text{[Adimensional]}$$

en donde,

$S$  = coeficiente de almacenamiento

$S_y$  = rendimiento específico, adimensional

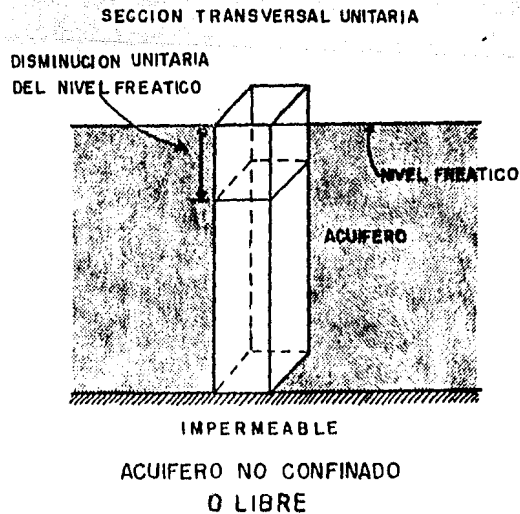
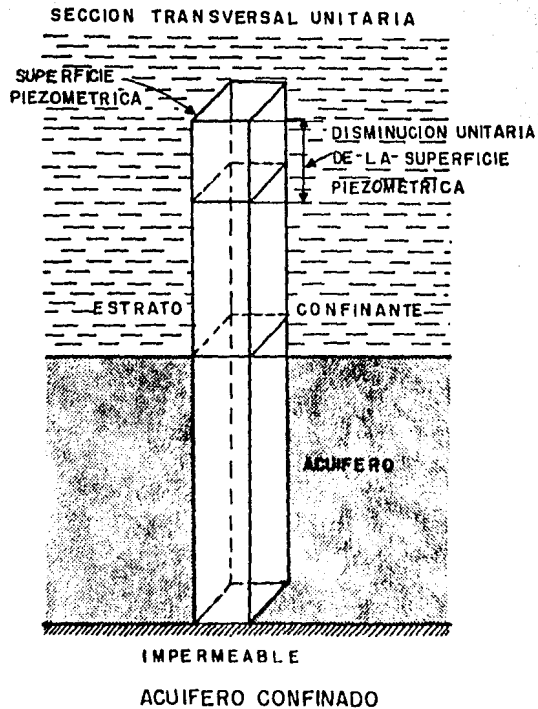
$b$  = espesor del acuífero, en L

$S_s$  = coeficiente de almacenamiento específico, expresado en 1/L

Se define como coeficiente de almacenamiento específico  $S_s$ , a la cantidad de agua liberada por unidad de volumen de material, cuando la carga hidráulica decrece una unidad.

En cambio, en un acuífero libre, el volumen de agua liberado por compactación del acuífero y expansión del agua, es el volumen liberado por el drenado del material (representado por el rendimiento específico). Como el primer volumen es muy pequeño en comparación con el segundo, se puede considerar que el coeficiente de almacenamiento de un acuífero libre es igual a su rendimiento específico.

CONCEPTO GRAFICO DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

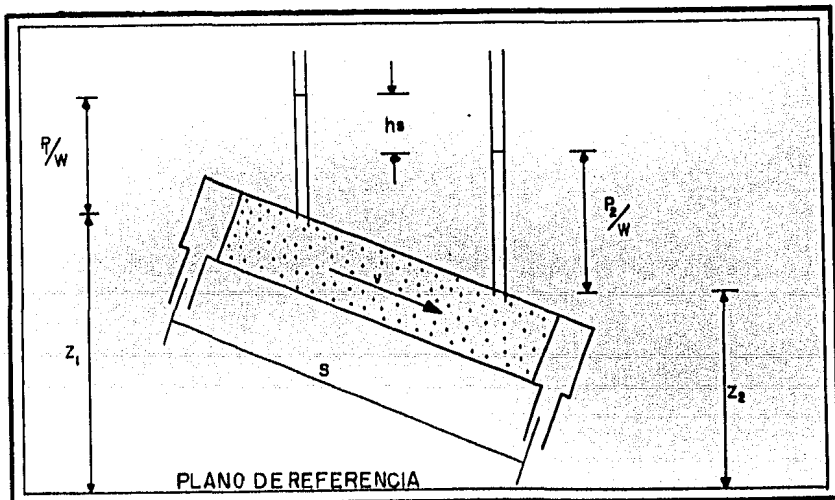




## II-10. Ley de Darcy

El investigador francés Henry Darcy, orientado hacia el campo experimental, y particularmente hacia la investigación del rozamiento en las fórmulas del movimiento a través de tubos, reportó, en el año de 1856, resultados de sus trabajos realizados sobre el flujo de agua a través de capas horizontales de arenas que tenían como finalidad el filtrar agua, concluyendo que los experimentos llevados a cabo demostraban positivamente que el gasto de agua que pasa a través de una capa de arena de una naturaleza determinada, era directamente proporcional al área  $A$  de la superficie normal al escurrimiento y a la diferencia  $H_0 - H$  entre cargas de fluido en las caras de entrada.

La verificación experimental de la Ley de Darcy puede ser realizada con un gasto que a través de un cilindro u otra sección transversal empacada con arena y con piezómetros a una distancia  $s$  como se muestra en la figura.



La ecuación de equilibrio en los puntos de lectura pie zométrica serán según la ecuación de Energía:

$$\frac{P_1}{W} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{W} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_s$$

donde,

$P$  = es la presión en los puntos

$W$  = es el peso específico del agua

$\frac{V^2}{2g}$  = carga de velocidad

$Z$  = la carga de posición

$h_s$  = la suma de pérdidas de carga en el recorrido entre los puntos 1 y 2.

En vista de que en materiales de porosidad media la velocidad es baja, las cargas de velocidad pueden despreciarse sin incurrir en un error apreciable quedando como sigue:

$$h_s = \left( \frac{P_1}{W} + Z_1 \right) - \left( \frac{P_2}{W} + Z_2 \right)$$

Por lo que la pérdida de carga es la pérdida de potencial dentro del cilindro de arena debida a pérdidas de fricción, energía que se disipa en forma de calor siendo esto independiente de la pendiente que se tenga en el cilindro.

Las experiencias de Darcy muestran que el gasto (Q) es directamente proporcional a la pérdida de carga (hs) o inversamente proporcional a la distancia recorrida s. Introduciendo una constante de proporcionalidad K, tenemos:

$$Q = - KA \frac{hs}{s} \quad [L^3 T^{-1}]$$

que expresada en términos generales nos da:

$$Q = - KA \frac{dh}{ds} \quad [L^3 T^{-1}]$$

o en forma más simple:

$$v = - K \frac{dh}{ds} \quad [L T^{-1}]$$

donde  $\frac{dh}{ds}$  es igual al gradiente hidráulico (i)

quedando finalmente:

$$v = - Ki \quad [L T^{-1}]$$

La velocidad del flujo es igual al producto de la constante K, conocida como el coeficiente de permeabilidad, por el gradiente hidráulico; la velocidad es definida por el cociente obtenido al dividir el gasto (Q) de descarga entre la sección transversal del área (A) que está drenando,

éstas lecturas pueden tener variaciones alrededor de una media; dicha ecuación es muy conocida y aplicada en el caso de flujo en medios porosos considerando flujos laminares.

## CAPITULO III

### PRUEBAS DE BOMBEO

#### III-1. Introducción

Las pruebas de bombeo, en sus múltiples variantes, son la principal herramienta de que se dispone para el estudio del comportamiento de pozos, predicción de caudales y descensos futuros, y obtención de valores representativos de las características de los acuíferos, tales que no tengan el carácter local y la dudosa validez de los ensayos en laboratorio o en sondeos.

En general, las pruebas de bombeo son de costo elevado y por tanto precisan de una correcta planificación para no cometer errores lamentables que después impidan una adecuada interpretación.

En el presente capítulo se expondrá la preparación y ejecución de las pruebas de bombeo para un mejor entendimiento de la hidráulica de pozos.

### III-2. Objetivos de las Pruebas de Bombeo

El objetivo más usual es el de obtener información -- acerca del comportamiento y eficiencia del pozo mientras -- éste se bombea. En tal caso, el resultado se reporta en -- términos de la descarga, el abatimiento observado y la capacidad específica calculada. La anterior información, analizada bajo ciertas condiciones, nos dará una medida de la capacidad productora del pozo terminado y nos permitirá -- tener una base para la selección del equipo de bombeo.

Otro objetivo de las pruebas, y que ha adquirido gran importancia, es el de suministrar datos de los cuales se -- obtienen los factores principales para calcular el comportamiento de los acuíferos. Una prueba organizada con este propósito puede denominarse, con más propiedad, una prueba de acuífero.

### III-3. Tipos de Pruebas de Bombeo

Los bombeos en los que se observan los descensos producidos en otros pozos o en piezómetros (el pozo de bombeo se suele medir también) se les llama Pruebas de Bombeo. Las mediciones de los niveles del agua, después del cese de -- bombeo en el propio pozo de bombeo y/o en los pozos y piezómetros de observación, se le llama ensayo de recupera---ción.

Todos los bombeos se realizan en condiciones controladas a fin de que conocida la variación de una magnitud y -- sus efectos, poder determinar las características del acuífero o del pozo de bombeo. En general se trata de bombeos a caudal constante, por lo menos durante ciertos intervalos

de tiempo. Los ensayos a descenso constante y caudal variable son menos usuales y su realización es más complicada, excepto en pozos surgentes.

Las pruebas de bombeo comportan un descenso progresivo de niveles debido al agrandamiento del cono de influencia, hasta que llega un momento en que la recarga iguala al bombeo y entonces se llega a un régimen estacionario. Teóricamente, en acuíferos confinados y en acuíferos libres sin recarga, el régimen estacionario no se alcanza nunca, pero para pozos y piezómetros relativamente próximos al pozo de bombeo en comparación con el radio de influencia, se llega a un estado casi estacionario, que para efectos prácticos se puede considerar como régimen estacionario.

Las pruebas a caudal constante hasta lograr el régimen estacionario pueden ser más fáciles de interpretar ya que no influye el o los coeficientes de almacenamiento del sistema acuífero; pero precisan de varios puntos de observación nivelados topográficamente y el tiempo de bombeo puede ser mucho más elevado, en especial en acuíferos libres. Las pruebas a caudal constante con medida e interpretación del régimen variable son mucho más frecuente, precisan de menos puntos de observación (no es preciso que estén nivelados), pueden ser más breves y permiten determinar el coeficiente de almacenamiento, aunque ello puede ser un factor de complicación; cuando se realiza un ensayo hasta lograr el régimen estacionario, la observación del régimen variable proporciona con un pequeño gasto extra, datos complementarios de gran valor.

Con una Prueba de Bombeo puede obtenerse lo siguiente:

- a). Transmisibilidad del acuífero.
- b). Coeficiente de almacenamiento del acuífero.
- c). Características del acuífero propias o en relación con su contorno.
- d). Presencia y situación de límites.
- e). Datos para extrapolar razonablemente los descensos del pozo sometido a una larga explotación.
- f). Eficiencia real del pozo.

#### III-4. Selección del lugar de la Prueba de Bombeo

Cuando se desea realizar una prueba de bombeo para determinar las características del acuífero, es preciso seleccionar un lugar que reúna ciertas condiciones que faciliten no sólo la ejecución sino también la interpretación y tal que los datos que se obtengan representen las características medias buscadas con la mejor garantía posible.

Desde el punto de vista de la Hidrología Subterránea, conviene que en el lugar elegido concurren las siguientes condiciones:

- 1). Que en ese lugar el acuífero sea lo más homogéneo posible.
- 2). Que el acuífero responda a un modelo sencillo.
- 3). Que no existan barreras próximas o que por lo menos estén bien definidas; que no se esperen cambios laterales de permeabilidad y/o espesor importante.



- 4). Que el flujo natural sea inexistente o con un -  
gradiente pequeño y conocido, o por lo menos mu-  
cho menor que el creado por el bombeo en el área  
de observación.
- 5). Que se conozca bien la estructura geológica del  
subsuelo.
- 6). Que no existan bombeos próximos u otras actividad  
des que provoquen variaciones grandes en el ni-  
vel del agua.
- 7). Si el acuífero es libre, que el nivel freático  
sea lo suficientemente profundo como para no te-  
ner que considerar efectos de evapotranspiración  
ni recargas rápidas por pequeñas lluvias.
- 8). Que el agua bombeada no vuelva al acuífero.

Desde el punto de vista económico se requieren las si-  
guientes condiciones:

- 1). Que de ser posible exista ya un pozo para el bombeo  
que reúna las debidas condiciones y que sea  
posible su utilización.
- 2). Aprovechar los pozos o piezómetros si es que -  
existen para realizar en ellos mediciones. Es preci  
so que estos puntos de agua sean accesibles y  
medibles y que no existan bombeos en ellos durante  
el ensayo.
- 3). Que existan informes geológicos, hidrogeológicos  
o geofísicos realizados previamente y que sean -  
accesibles.

- 4). Que en caso de tener que pagar indemnizaciones - por uso de pozo, afecciones a cultivos o instalaciones, sean los menores posibles y sobre todo, que sea fácil y factible obtener permisos de uso y acceso.
- 5). Que sea fácil y barata la eliminación del agua - bombeada, sin crear problemas a terceros.

Desde el punto de vista operacional son necesarias las siguientes condiciones:

- 1). Que existan facilidades de aforo o para instalar un aforador.
- 2). Que sea rápido instalar la tubería o canal de -- desagüe.
- 3). Que tanto en el pozo de bombeo como en los puntos de observación sea fácil medir el nivel del agua, sin temor a obstrucciones ni falsamientos.
- 4). Que los desplazamientos entre los diferentes lugares en que se efectúan medidas sean seguros y cómodos.
- 5). Que existan facilidades para disponer de energía eléctrica.

Es muy importante realizar o disponer de un croquis que comprenda por lo menos 1 Km alrededor del pozo de bombeo seleccionado, en el que se relacionen los pozos, sondeos, piezómetros, norías, ríos, canales, lagunas y toda la infraestructura existente.

### III-5. Características del Pozo de Bombeo

Para la realización correcta de una prueba de bombeo, el pozo debe reunir, si es posible, las siguientes condiciones:

- 1). Debe ser totalmente penetrante en el acuífero.
- 2). No debe tener rejilla en más de un acuífero.
- 3). Debe estar limpio y bien desarrollado, de tal modo que en el bombeo no se alteren las condiciones de permeabilidad en el entorno del acuífero.
- 4). Debe ser eficiente y a ser posible con una rejilla adecuada y con macizo de gravas.
- 5). Debe tener un diámetro suficiente para permitir colocar la bomba dejando espacio para poder efectuar mediciones de nivel.
- 6). Deben conocerse los materiales atravesados y la historia de la construcción.

Si el pozo es parcialmente penetrante o incompleto, es preciso conocer la situación de las rejillas en relación con el espesor del acuífero, para después efectuar las correcciones precisas en los descensos que se midan.

### III-6. Piezómetros y Pozos de Observación

#### III-6.1 Piezómetros

La instalación de piezómetros para medir los niveles es, en general, costosa, y por ello se trata de aprovechar los pozos ya existentes como puntos de medición. Si se han de instalar piezómetros ex profeso, puede aprovecharse la

ocación para adquirir nuevos conocimientos sobre la geometría del sistema, y si es posible alguna perforación debe tratar de llegar, a la base del acuífero.

Si se desean observar sólo condiciones medidas del acuífero, sin tener en cuenta la presencia de posibles componentes verticales del flujo, deben instalarse piezómetros ranurados en todo el espesor del acuífero, en especial en las proximidades del pozo de bombeo; pero debido a su alto costo no se utilizan frecuentemente. Es más común hacer los piezómetros poco penetrantes y con rejilla corta, pero entonces debe tenerse en cuenta los posibles efectos de penetración parcial del pozo de bombeo y de la anisotropía del acuífero.

### III-6.2 Pozos de Observación

Los pozos de observación deben ser suficientemente amplios como para permitir mediciones rápidas y precisas del nivel de agua. Los pozos pequeños son mejores, puesto que el volumen de agua contenido en un pozo de gran diámetro puede dar lugar a que los cambios de abatimiento sufran algún retardo. Los pozos de observación de 5cm de diámetro, resultan ideales cuando se emplean métodos manuales para medir el nivel; si se usa un registrador automático de niveles el ademe del pozo deberá tener un diámetro no menor de 15 centímetros.

Los pozos de observación se construyen por lo general, con rejillas de 0.9 a 1.8 metros de longitud. La profundidad de estos pozos debe coincidir con la línea media de la rejilla que se instale en el pozo de bombeo. La excepción a la regla la constituyen aquellos pozos de observación que

terminan en estratos situados por encima o por debajo de -  
aquel que ha sido penetrado por el pozo de bombeo, con el  
objeto de verificar si existe alguna conexión hidráulica -  
entre las formaciones.

Conviene nivelar los piezómetros y pozos de observa--  
ción dejando en ellos una señal de referencia de niveles  
(puede bastar el bordo del tubo); también se recomienda me  
dir los niveles antes del bombeo, para ver si existe flujo  
natural y en qué dirección y sentido.

### III-7. Emplazamiento de los pozos de observación

Son dos factores que determinan el emplazamiento de  
los pozos de observación. Primero, el acuífero presenta -  
por lo general un cierto grado de estratificación y no es  
uniforme en todo el espesor. Segundo, la longitud de la -  
rejilla en el pozo de bombeo puede que sea considerablemen  
te menor que el espesor completamente saturado del acuífero.

Ambos factores distorsionan la distribución de la car  
ga hidráulica y del abatimiento en la vecindad del pozo de  
bombeo durante la prueba, de manera pues que los pozos de  
observación no deben situarse muy cerca de éste. Los efec-  
tos anormales desaparecen probablemente desde el punto de  
vista práctico, a distancias que van desde 3 a 5 veces el  
espesor del acuífero; pero en la mayoría de los casos, re-  
sulta mejor situar los pozos de observación a distancias -  
de 30 a 90 metros desde el pozo de bombeo.

Puesto que el cono de depresión en condiciones freá--  
ticas se extiende a una velocidad menor que en una forma--

ción artesiana, los pozos de observación para una prueba de un acuífero en condiciones libres deberán estar necesariamente más cerca al pozo de bombeo. En acuíferos artesianos de mucho espesor y que estén considerablemente estratificados, las distancias deberán ser mayores y los pozos de observación puede que deban situarse a 90 y hasta 120 m o más, del pozo de bombeo, para obtener datos apropiados.

### III-8. Número de pozos de observación

El número de pozos de observación que deben emplearse depende de la cantidad de información que se desea obtener y de la financiación disponible para realizar el programa. Los datos que se obtengan mediante la medición de los abatimientos en un solo punto fuera del pozo de bombeo, permitirán calcular la permeabilidad promedio en el acuífero y la transmisibilidad conjunta con su coeficiente de almacenamiento. Si se emplazan dos o más pozos de observación a diferentes distancias, los datos suministrados por la prueba pueden analizarse de dos manera, estudiando tanto la relación de tiempo-abatimiento, como la de distancia-abatimiento.

Tanto la bomba como la unidad de potencia que se utilicen en una prueba de acuífero, deberán ser capaces de -- operar ininterrumpidamente a caudal constante y por un período de no menos de 48 hrs. En aquellos casos en que los pozos de observación deban localizarse a distancias considerables del bombeo, la bomba deberá funcionar continuamente por varios días.

### III-9. Medidas y ajuste del caudal

La verificación de la razón de descarga o caudal durante una prueba de bombeo, necesita de un aditamiento preciso para medir la descarga de la bomba y una manera conveniente de ajustarla para mantener ésta lo más constante posible. El mejor control se obtiene mediante una válvula instalada en la descarga de la bomba. El tamaño de la tubería de descarga y el de la válvula, deberá ser tal que esta última permanezca abierta la mitad o tres cuartas partes, cuando se esté bombeando a la descarga deseada. El tratar de regular la descarga de la bomba mediante el recurso de cambiar su velocidad, no siempre resulta satisfactorio. Es todavía más inconveniente cuando la bomba trabaja a descarga abierta y entrega el agua a baja presión.

Un método simple y exacto de determinar la descarga de la bomba consiste en observar el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido; es importante tener en cuenta lo siguiente:

- a). El recipiente sea de volumen bien conocido y esté en buen estado de conservación. Muchos operarios descuidados emplean bidones abollados, con el con siguiente error en volumen.
- b). La tubería de conducción del agua debe ser giratoria a fin de poderla colocar sobre el recipiente y quitarla con rapidez; es recomendable el uso de mangueras en el suelo que se elevan para llenar el depósito ya que la variación de cota de la salida del agua puede afectar el caudal de bombeo.

c). El recipiente debe poderse vaciar fácilmente, de prisa y sin producir derrame de agua.

Este sistema de medición discontinua es a veces molesto para el operador, pero se puede tener una precisión elevada; el método se adapta mejor y es más práctico cuando se trata de medir caudales pequeños.

También puede utilizarse un contador catalizador para medir la cantidad de flujo bombeado en un tiempo dado. La carátula del contador muestra el volumen total en metros cúbicos descargados a través del medidor. El caudal puede obtenerse por diferencias entre dos lecturas dividido por el tiempo transcurrido entre las mismas; pueden producirse algunos errores de lectura del volumen indicado en el dial y en el totalizador del contador en ciertas posiciones debido a no saberse si una de las cifras del totalizador ha cambiado ya o no; este error es en general de  $1 \text{ m}^3$ ; para caudales pequeños conviene fijarse bien o tomar un tiempo largo entre lecturas.

Existe un artefacto denominado "recipiente con orificios" que sirve para medir con más facilidad la descarga - de hasta 35 metros cúbicos por hora. Consiste de un tanque cilíndrico pequeño con una o más aberturas circulares situadas en el fondo. El agua que se va a medir, cae dentro del tanque y descarga a través de los orificios. El recipiente se llena con agua hasta un nivel en que la carga de presión hace que la salida por los orificios sea justamente igual al caudal que llega a la bomba.



Cerca del fondo del recipiente, se instala contra la pared de éste, un tubo piezométrico con su respectiva escala graduada. El artefacto debe calibrarse y se prepara una curva de calibración que muestre la descarga a través de un solo orificio de tamaño dado, en función de varios valores de la carga de presión. La razón de descarga dada por la curva se multiplica por el número de orificios que se estén utilizando y se obtiene la descarga total para un nivel dado de agua. Véase la figura III-1 donde se muestran los detalles de la construcción de un recipiente con orificios de aberturas múltiples.

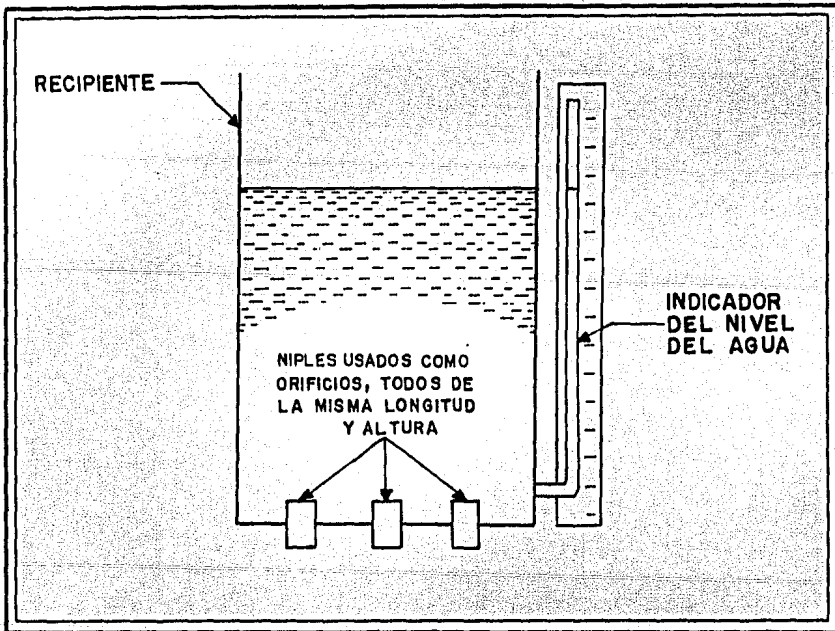


FIG. III-1 RECIPIENTE CON ORIFICIOS

El método de orificio calibrado, es el más preciso y más comúnmente empleado para determinar el gasto de producción de un pozo, tiene las ventajas que el equipo utilizado es compacto y de fácil instalación; consta principalmente de:

- 1). Un tubo con una longitud no menor de 1.22m (48") conectado al cabezal de descarga en un de sus extremos y en el otro deberá permitir la conexión de un porta orificio. A una distancia no menor de 61.0cm (24") del extremo libre, deberá contar con una perforación que permita conectar un piezómetro como se indica en la figura III-2.
- 2). Un porta orificios que permita con facilidad intercambiar orificios de diferente medida.

Para obtener las mayores ventajas de éste método se - deberá tomar en consideración:

- 1). El tubo de descarga deberá estar en posición horizontal y la descarga completamente libre.
- 2). Los bordes de los orificios biselados preferentemente a  $45^{\circ}$  con el borde del filo en dirección - aguas arriba.
- 3). El diámetro del orificio deberá estar comprendido entre  $1/2$  a  $3/4$  el diámetro del tubo de descarga, y siempre debe trabajar completamente lleno.
- 4). El piezómetro no debe tener burbujas y no sobresalir de la superficie interior del tubo de descarga.

Para obtener el gasto mediante la aplicación de éste método, se deberán seguir los siguientes pasos:

- 1). Medir el Nivel Estático.
- 2). Medir el Nivel de Bombeo.
- 3). Medir la altura del agua del interior del piezómetro, como se indica en la figura III-2, en cms.
- 4). Con ayuda de la tabla III-1, que relaciona diámetro de orificio con diámetro de descarga, encontramos la constante  $K'$ , que al sustituirla en la ecuación  $Q = K' \cdot h$  nos dará el gasto en lts/seg.

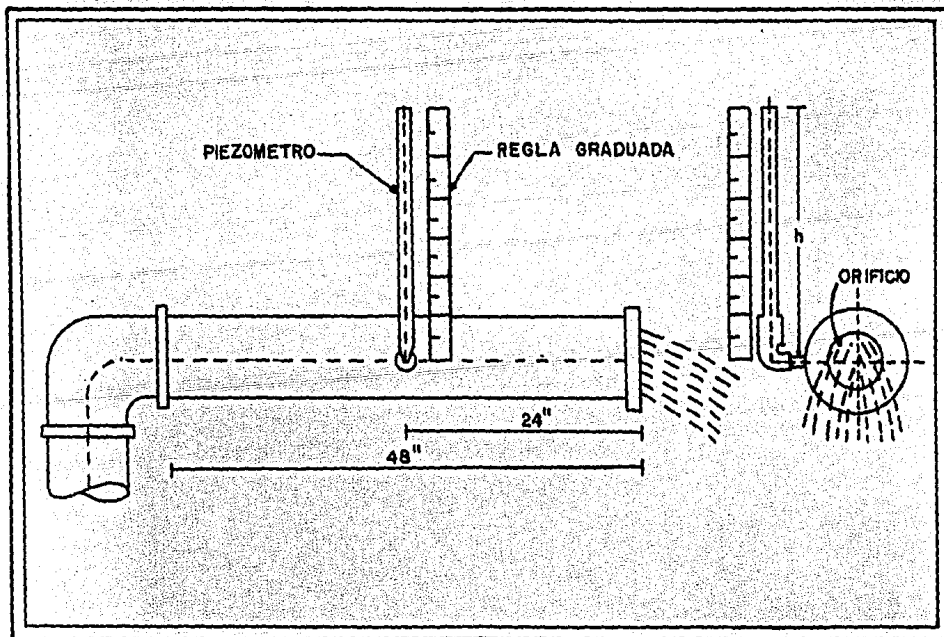


FIG. III-2 METODO DE ORIFICIO CALIBRADO

TABLA III - 1  
VALORES DEL COEFICIENTE  
DE  
DESCARGA K' EN TUBERIAS

DIAMETRO DE ORIFICIO (")	DIAMETRO DE DESCARGA EN PULGADAS								
	3	4	5	6	7	8	9		
2	0.639	0.453	0.562	0.553	0.697	0.859			
2 1/4	0.892	0.960	0.716	0.706	0.870	0.859			
2 1/2	1.243	0.973	0.901	0.881	1.057	1.048			
2 3/4		1.256	1.117	1.074					
3		1.862	1.365	1.298	1.276	1.253	1.231		
3 1/4		2.406	1.666	1.553	1.503	1.452	1.461		
3 1/2			2.014	1.845	1.736	1.736	1.705		
3 3/4			2.306	2.165	2.061	2.005	1.953		
4			3.097	2.546	2.387	2.303	2.248		
4 1/4				2.979	2.759	2.648	2.553		
4 1/2				3.575	3.172	3.021	2.890		
4 3/4				4.206	3.615	3.420	3.240		
5				4.973					
5 1/4					4.177	3.354	3.606		
5 1/2					4.862	4.350	4.024		
5 3/4					5.259	4.889	4.476		
6					6.572	5.546	4.954		
6 1/4						6.356	5.479		
6 1/2						7.280	6.019		
6 3/4						8.299	6.650		
7							7.303		
7 1/4							8.042		
7 1/2							8.833		
7 3/4							9.931		
8							11.047		
8 1/4							12.334		
8 1/2							13.533		

El método de Escuadra de Carpintero, permite medir -- gastos en descargas a tubo lleno o parcialmente lleno, su aplicación es sencilla y consiste en tener un tubo de descarga acoplado al cabezal de la bomba con una longitud no menor de 1.5m (3') para sostener un flujo en su interior y descarga libre en su extremo.

Cuando se tiene un tubo de descarga lleno y se desea conocer el gasto aproximado, se hace necesario conocer la distancia horizontal  $A$ , la cual se mide como lo indica la figura III-3 y junto con el diámetro del tubo de descarga se entra en el nomograma (1), obteniéndose directamente el gasto correspondiente.

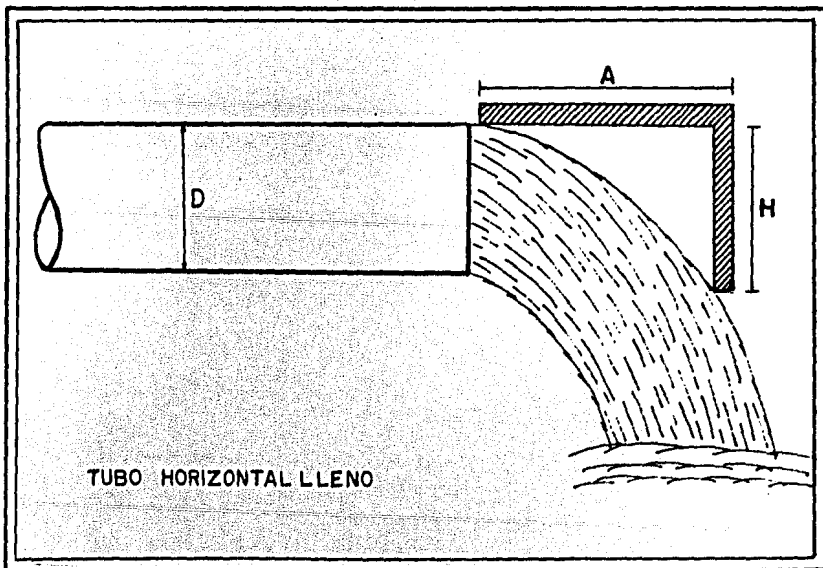
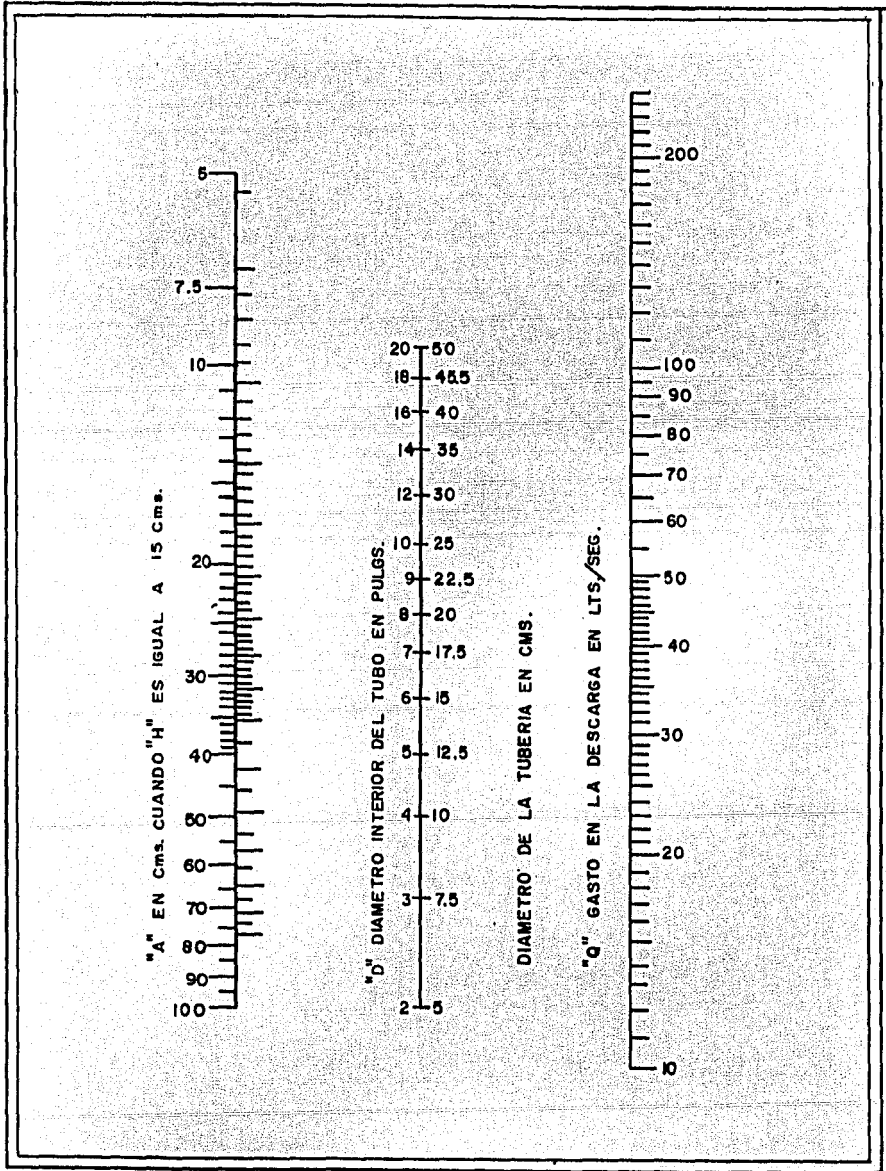


FIG. III-3 METODO DE ESCUADRA DE CARPINTERO



NOMOGRAMA (I) PARA CALCULAR EL GASTO A TRAVES DE UN TUBO LLENO O PARCIALMENTE LLENO.

Cuando la descarga sea en un tubo parcialmente lleno, el procedimiento es igual al anterior, excepto en la forma de medir la distancia A, la cual se efectuará de acuerdo a la figura III-4.

En este caso para obtener el gasto real será necesario calcular el valor de la relación  $X/D$ , en donde X representa el tirante del agua dentro del tubo de descarga, D es - el diámetro interior, con este dato interpolado en la tabla III-2 se obtiene un valor en porciento (%).

Con el valor de A y el diámetro del tubo se entra al nomograma (1), que corresponde a tubo lleno, obteniéndose así un gasto que multiplicado por el valor de porciento -- antes obtenido se tiene el gasto real (corregido).

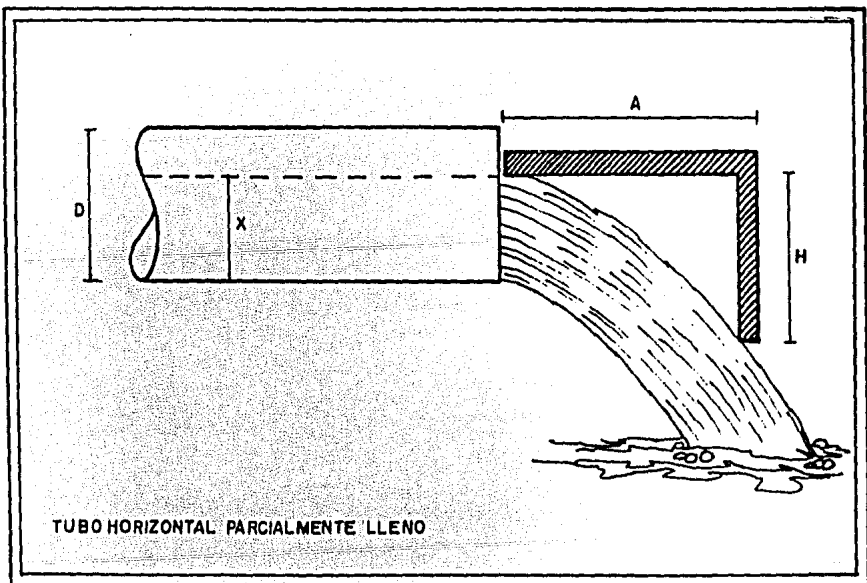


FIG. III-4 METODO DE ESCUADRA DE CARPINTERO

TABLA III - 2

VALORES DE LA RELACION X/D

X/D	%	X/D	%	X/D	%	X/D	%
0.01	0.17	0.27	21.79	0.53	53.82	0.79	84.73
0.02	0.47	0.28	22.92	0.54	55.09	0.80	85.77
0.03	0.88	0.29	24.06	0.55	56.35	0.81	86.77
0.04	1.34	0.30	25.24	0.56	57.63	0.82	87.76
0.05	1.87	0.31	26.41	0.57	58.89	0.83	88.73
0.06	2.44	0.32	27.59	0.58	60.13	0.84	89.67
0.07	3.08	0.33	28.78	0.59	61.40	0.85	90.59
0.08	3.74	0.34	29.98	0.60	62.64	0.86	91.49
0.09	4.46	0.35	31.19	0.61	63.89	0.87	92.36
0.10	5.21	0.36	32.42	0.62	65.13	0.88	93.20
0.11	5.98	0.37	33.64	0.63	66.36	0.89	94.02
0.12	6.80	0.38	34.87	0.64	67.58	0.90	94.79
0.13	7.64	0.39	36.11	0.65	68.81	0.91	95.54
0.14	8.51	0.40	37.36	0.66	70.02	0.92	96.26
0.15	9.41	0.41	38.60	0.67	71.22	0.93	97.30
0.16	10.33	0.42	39.85	0.68	72.41	0.94	97.56
0.17	11.27	0.43	41.11	0.69	73.59	0.95	98.13
0.18	12.24	0.44	42.37	0.70	74.76	0.96	98.66
0.19	13.23	0.45	43.65	0.71	75.94	0.97	99.12
0.20	14.23	0.46	44.91	0.72	77.08	0.98	99.52
0.21	15.27	0.47	46.18	0.73	78.21	0.99	99.83
0.22	16.31	0.48	47.45	0.74	79.34	1.00	100.00
0.23	17.38	0.49	48.73	0.75	80.44		
0.24	18.45	0.50	50.00	0.76	81.54		
0.25	19.54	0.51	51.27	0.77	82.62		
0.26	20.66	0.52	52.55	0.78	83.69		



### III-10. Medidas de los niveles de agua

Durante la ejecución de una prueba de bombeo, debe medirse repetidas veces la profundidad del agua. Las lecturas deben efectuarse a intervalos muy cortos durante las primeras 2 horas de la prueba, aumentando el intervalo entre mediciones conforme la prueba avanza. Las mediciones del nivel del agua deben registrarse con aproximaciones de 5 milímetros en todos los pozos de observación. No siempre es esto posible cuando las mediciones se hacen en el propio pozo de bombeo, debido a las vibraciones o algunas otras causas provenientes de la prueba.

Las mediciones en el pozo de bombeo deben efectuarse cada 1/2 minuto durante los primeros 5 minutos contados a partir del inicio del bombeo; luego, cada 5 minutos durante una hora; después cada 20 minutos por alrededor de 2 horas. A partir de aquí, son suficientes las lecturas tomadas -- cada hora.

Las mediciones de nivel en los pozos de observación - deben tomarse cada 2 minutos desde el comienzo de la prueba y por espacio de una hora. En la siguiente hora, bastará con lecturas cada 5 minutos; en las que siguen, cada 10 minutos hasta concluir la prueba.

Para que se pueda realizar con precisión una prueba de bombeo, se necesitan medios exactos y rápidos de medir los niveles del agua. Los medios usuales son:

- 1). Sonda Eléctrica, consiste en un electrodo, un cable de dos hilos y un amperímetro que indica --- cuando se cierra el circuito y que el electrodo

ha tocado el agua. Este dispositivo es de los -- más utilizados en México, ver Figura III-5.

- 2). Los medidores acústicos por golpeo sobre la superficie del agua pueden ser útiles si la persona que los maneja es diestra; no son útiles en el pozo de bombeo debido al ruido de la bomba.
- 3). Los medidores acústicos por silbato, suelen ser menos precisos; los silbatos con muescas para de terminar el nivel del agua precisan que sean extraídos tras cada medición, lo cuál es muy engorroso o imposible si el nivel está profundo y -- las mediciones han de ser frecuentes.
- 4). Los medidores por mojado de una cinta graduada -- impregnada de yeso, son muy adecuados en la medi ción de régimen permanente, ya que no es esencial la rapidez y la repetición de medidas.
- 5). Los medidores basados en la pérdida de tensión -- del cable que sostiene una boya que flota en la superficie del agua son en general poco precisos a menos que el flotador sea grande; los automáti cos son mejores que los de apreciación manual, aunque son frecuentes los paros fortuitos.
- 6). Las mediciones con línea de aire son en general insuficientemente precisas pero pueden ser útiles en el propio pozo de bombeo.

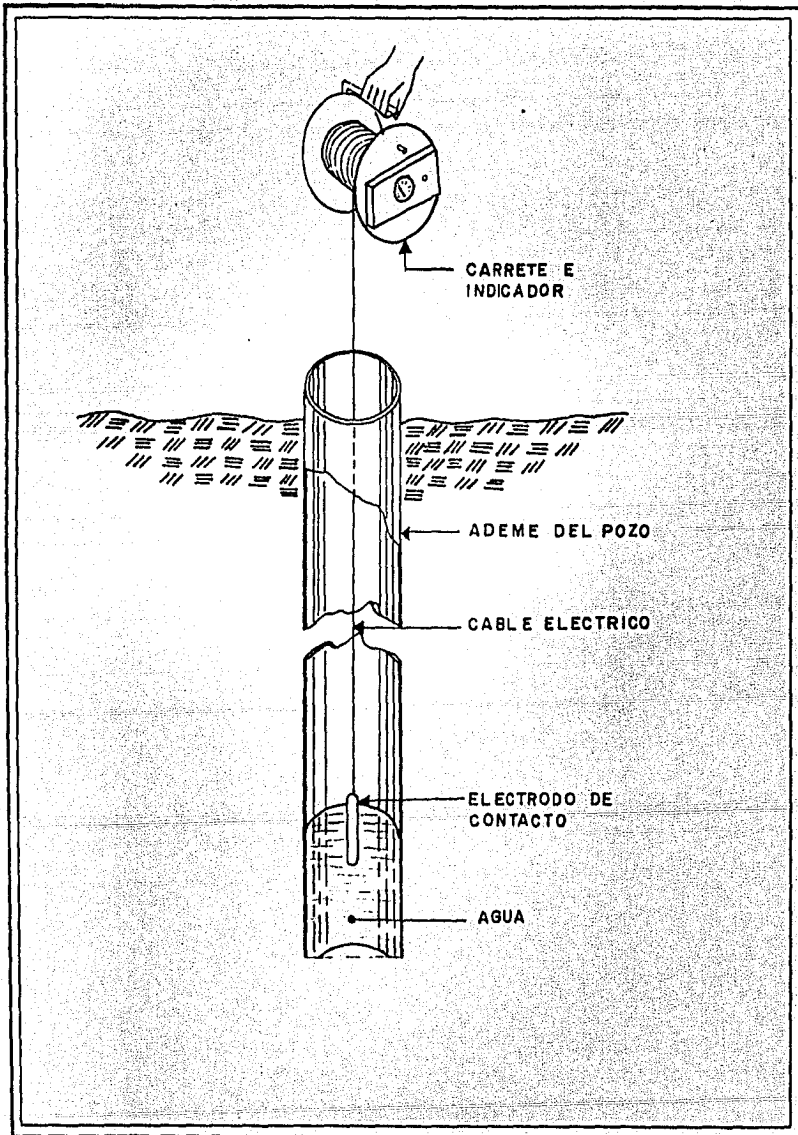


FIG. III-5 SONDA ELECTRICA

### III-11. Duración de las Pruebas de Bombeo

La duración de las pruebas de bombeo puede prolongarse según se deseen conocer las características del pozo y/o acuífero. En acuíferos cautivos los ensayos de 12 a 24 horas suelen ser suficientes, excepto que se quieran poner de relieve efectos de barreras o de semiconfinamiento, en caso es común llegar a 48 o 72 horas; en acuíferos cautivos profundos, a veces se consiguen resultados satisfactorios con sólo 3 a 6 horas de bombeo. En acuíferos libres, en general se precisan de ensayos más dilatados, de hasta 72 horas, en especial cuando se teme que sea importante el efecto de drenaje diferido. En los casos complejos de semiconfinamiento en los que se pueden producir descensos en acuíferos superpuestos o se utiliza el almacenamiento en los acuitardos, la prueba de bombeo se puede alargar hasta 6 o 7 días.

Después de la prueba de bombeo conviene medir la recuperación durante un tiempo similar al de bombeo, aunque -- por desgracia a unas pocas horas después del cese del bombeo se da por terminado la medición de los niveles del agua.

### III-12. Vertido del agua extraída

Deben de tomarse los cuidados necesarios para que el agua extraída no vuelva al acuífero, en especial cuando se trata de acuíferos libres poco profundos y/o con recarga - rápida. Aún en el caso de acuíferos cautivos, no conviene verter el agua en las proximidades del pozo de bombeo por las molestias que pueden originarse y por la posibilidad - de retorno al acuífero por entre la pared del pozo y el -- terreno, si no existe una protección suficiente.

Las precauciones que se deben tomar depende también - de la duración de la prueba; en una prueba de unas pocas - horas de duración el retorno del agua al acuífero puede -- que no tenga importancia, pero es posible que afecte a la prueba cuando se trata de ensayos de varios días o incluso semanas.

En general, el agua bombeada debe conducirse hasta -- una distancia superior al máximo radio de influencia (suele ser a más de 100m), a ser posible en el sentido del flujo del agua subterránea y lejos de puntos de observación.

## CAPITULO IV

### HIDRAULICA DE POZOS

#### IV-1. Introducción

La Hidráulica de Pozos es una de las materias más importantes del estudio del agua subterránea, ya que proporciona las bases teóricas para interpretar o prever las fluctuaciones de los niveles freáticos o piezométricos, provocados por la extracción de agua mediante pozos.

Los problemas que estudia la Hidráulica de Pozos son muy diversos, entre los más comunes mencionaremos los siguientes:

- 1). Identificación de sistemas de flujo y determinación de sus características hidráulicas. La identificación del sistema de flujo de que se trate (confinado, semiconfinado, libre, con frontera impermeable o de alimentación) y la determinación de sus características hidráulicas (como son: coeficiente de permeabilidad, transmisibilidad y ---

almacenamiento), son esenciales para estudiar el comportamiento de un acuífero. Tal conocimiento - es indispensable, en problemas de carácter local, como es:

- a). Prever el comportamiento de los niveles de agua bajo diferentes regímenes de bombeo de uno o varios pozos.

en problemas de carácter regional, tenemos:

- a). Cuantificación del volumen aprovechable de un acuífero.
  - b). Cálculo de los caudales de agua que circulan en el subsuelo.
  - c). Conocimiento de las variaciones del almacenamiento subterráneo.
  - d) Desarrollo de modelos de simulación de acuíferos.
- 2). Predicción del comportamiento de los niveles de - agua. Conocidas las características hidráulicas - del acuífero, mediante las fórmulas de la Hidráulica de Pozos es posible predecir los abatimientos que se provocarían bajo ciertas condiciones de -- bombeo.

- 3). Diseño de Pozos. El problema consiste en definir el número, distribución (esparcimiento y arreglo) y régimen de operación (caudal y tiempo de bombeo) convenientes, de los pozos necesarios para la extracción de un caudal total.
- 4). Definición de régimen de operación de pozos, dada una restricción en el abatimiento de los niveles. Específicamente, en un acuífero costero el problema puede ser la definición de un régimen de bombeo de uno o varios pozos, tal que los niveles -- freáticos o piezométricos no descienda abajo de un nivel crítico, impuesto por el riesgo de contaminación.
- 5). Drenaje vertical. En terrenos agrícolas los niveles freáticos someros constituyen un problema por afectar los sistemas radiculares de los cultivos o propiciar la salinización del suelo; en áreas urbanas, dicha condición obstaculiza la construcción de cimentaciones.
- 6). Recarga artificial. Uno de los métodos utilizados para recargar un acuífero consiste en la inyección de agua a través de pozos. Conocidas las características del sistema acuífero, puede deducirse la capacidad de absorción de uno o varios pozos y -- predecirse la respuesta de los niveles a la recarga.



- 7). Recarga natural. En el estudio de los acuíferos - es indispensable conocer el tipo de recarga natural que alimenta a un acuífero, pudiendo ser: la precipitación, un río o laguna la que suministre dicha recarga y la cuál determinara el comportamiento del acuífero.

Dada la importancia de la Hidráulica de Pozos, en el presente capítulo se expondran sus principios generales, - así como la obtención y aplicación de las fórmulas fundamentales que relacionan las características del acuífero, del pozo, de los descensos producidos y el tiempo de bombeo. La aplicación se efectuará en base a datos obtenidos a partir de los ensayos de bombeo, realizados en el municipio de Calera de Victor Rosales, estado de Zacatecas y que fueron proporcionados por la Subdirección de Geohidrología y Zonas Aridas de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (S.A.R.H.).

#### IV-2. Mecanismo del flujo hacia un pozo

Cuando un pozo es bombeado, la superficie freática - (o piezométrica) del acuífero es abatida en sus alrededores. El abatimiento provocado es máximo en el pozo de bombeo y decrece conforme aumenta la distancia al pozo, hasta ser prácticamente nulo. Como el abatimiento a cierta distancia del pozo es el mismo en todas direcciones, el área de influencia del bombeo es un círculo (si el acuífero es relativamente homogéneo e isótropo) cuyo radio depende de las características hidráulicas y del tiempo de bombeo, -- entre otros factores.

Dado que la presión mínima se tiene en el pozo de bombeo, el agua fluye hacia él desde todas direcciones. Si el flujo es horizontal, conforme el agua se acerca al pozo, se mueve a través de superficies cilíndricas de área cada vez menor; como consecuencia, la velocidad del agua va incrementándose conforme ésta se acerca al pozo. Puesto que la velocidad es proporcional al gradiente hidráulico, de acuerdo con la ley de Darcy, la pendiente de la superficie piezométrica se incrementa gradualmente hacia el pozo, lo que da a dicha superficie una forma aproximadamente cónica. Por ello, a la depresión piezométrica provocada por el bombeo, se le acostumbra llamar "cono de depresión".

El agua bombeada por el pozo es tomada del almacenamiento del acuífero. Si no hay recarga vertical en el área afectada por el bombeo, la depresión piezométrica se va expandiendo afectando un área cada vez mayor. Al crecer el área afectada, los abatimientos necesarios para mantener la

extracción del pozo son cada vez menores, alcanzándose un momento en el que la superficie piezométrica se estabiliza en las proximidades del pozo. En estas condiciones se dice que el flujo está establecido. Véase figura IV-1.

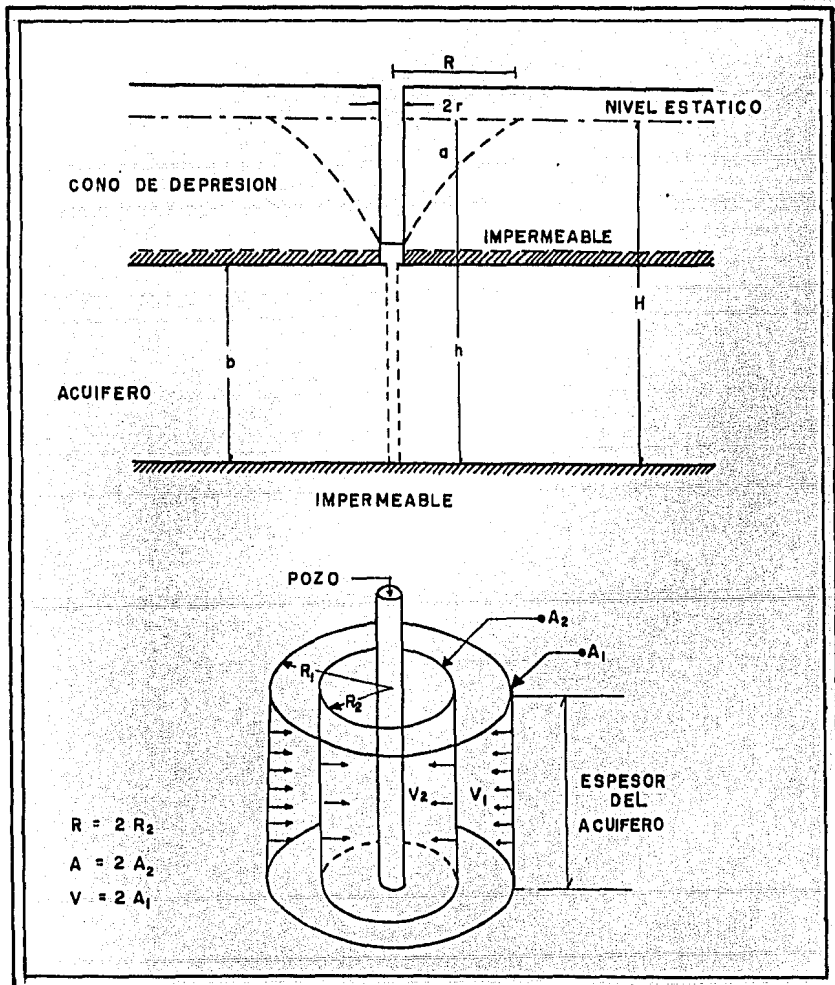
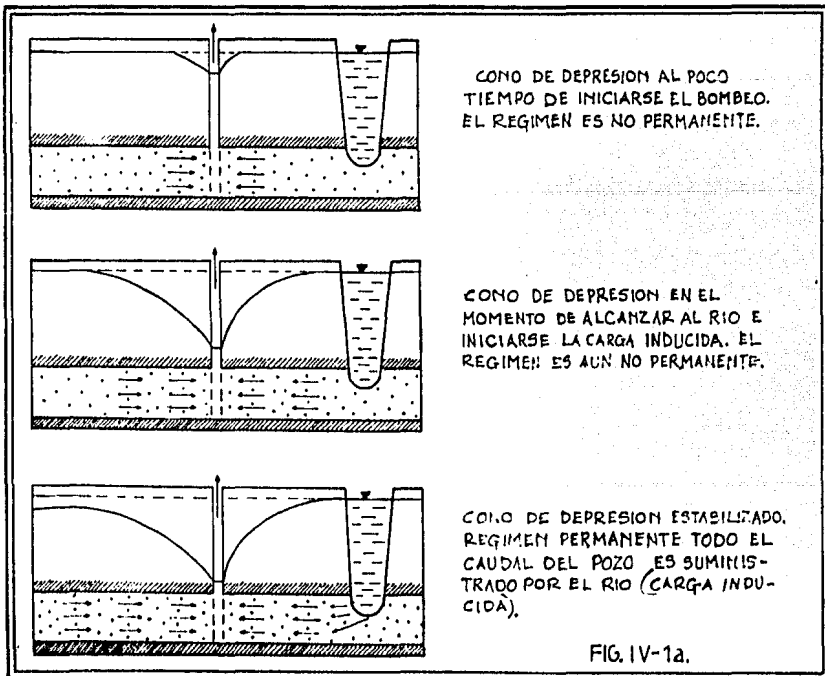


FIG.IV-1 MECANISMO DEL FLUJO HACIA UN POZO EN UN ACUIFERO

### IV-3. Efectos de la recarga en los acuíferos

Cuando el cono de depresión tiende a volverse estable y se acerca a las condiciones de equilibrio durante una prueba de bombeo, el efecto que ejerce sobre la pendiente de la recta de distancia-abatimiento, es casi imperceptible por lo general. El cono de depresión se puede estabilizar como resultado de alguna recarga por precipitación, percolación provenientes de estratos saturados sobreyacentes al acuífero propiamente dicho o por el flujo natural de agua subterránea que tiene lugar en el pozo o a un lado de éste. El equilibrio también puede ser el resultado de alguna recarga producida por un río, como se observa en la figura IV-1a.



#### IV-4. Efectos de la barrera en los acuíferos

Si el cono de depresión de un pozo alcanza una barrera impermeable del acuífero, no puede extenderse en esa -- dirección y por tanto los descensos entre el pozo y las barreras han de ser mayores y más rápidos para poder proporcionar el agua que de otro modo hubiese sido suministrada por la extensión del cono más allá de la barrera mencionada. Si la barrera no es de todo impermeable el efecto es -- algo más amortiguado y el cono puede extenderse algo más -- allá de la barrera.

De forma similar, si el cono de depresión de un pozo alcanza un borde capaz de mantener el nivel constante, por ejemplo un río, un lago o el mar, el cono tampoco puede -- rebasar esa barrera, pero ahora el agua precisa para el -- bombeo es suministrada por la citada barrera y los descensos se estabilizan rápidamente.

Si el límite de potencial constante no es capaz de su suministrar toda el agua necesaria, los niveles no se estabilizan y el cono rebasa la barrera, pero los descensos se -- producen ahora más lentamente. Un efecto similar es producido por un aumento de la transmisibilidad del acuífero.

En un mismo campo de bombeo pueden coincidir varios -- tipos de barreras (se llaman barreras negativas a los bordes impermeables y barreras positivas a los de potencial -- constante) y entonces el efecto que se tiene es la combinación de efectos según el cono de depresión vaya alcanzando a los distintos límites.

#### IV-5. Efectos de la penetración parcial

A veces, razones constructivas obligan a que los pozos sean incompletos a pesar de trabajar éstos en peores condiciones que los completos, algunas de estas razones pueden ser:

- 1). Necesidad de alejar algunos decímetros el extremo de la zona filtrante de los límites superior e inferior del acuífero a fin de evitar problemas de entrada de materiales finos y derrumbamientos de arcillas (fig. IV-2a).
- 2). Necesidad de evitar algunas zonas del acuífero que contienen materiales exclusivamente finos, teniendo a veces que dividir la zona filtrante en --- tramos (fig. IV-2b).
- 3). Necesidad de explotar preferentemente una parte del acuífero, en general la superior, para evitar en lo posible la admisión de otras aguas de peor calidad existentes en el mismo. Este caso es frecuente en acuíferos costeros, con intrusión marina (fig. IV-2c).
- 4). Gran importancia del acuífero, de modo que resulta más económico obtener el caudal deseado con un pozo de peores condiciones pero más barato (fig. IV-2d).
- 5). Otras veces los pozos son incompletos por estar la construcción mal proyectada o bien por haberse colocado mal las zonas filtrantes (fig. IV-2e).

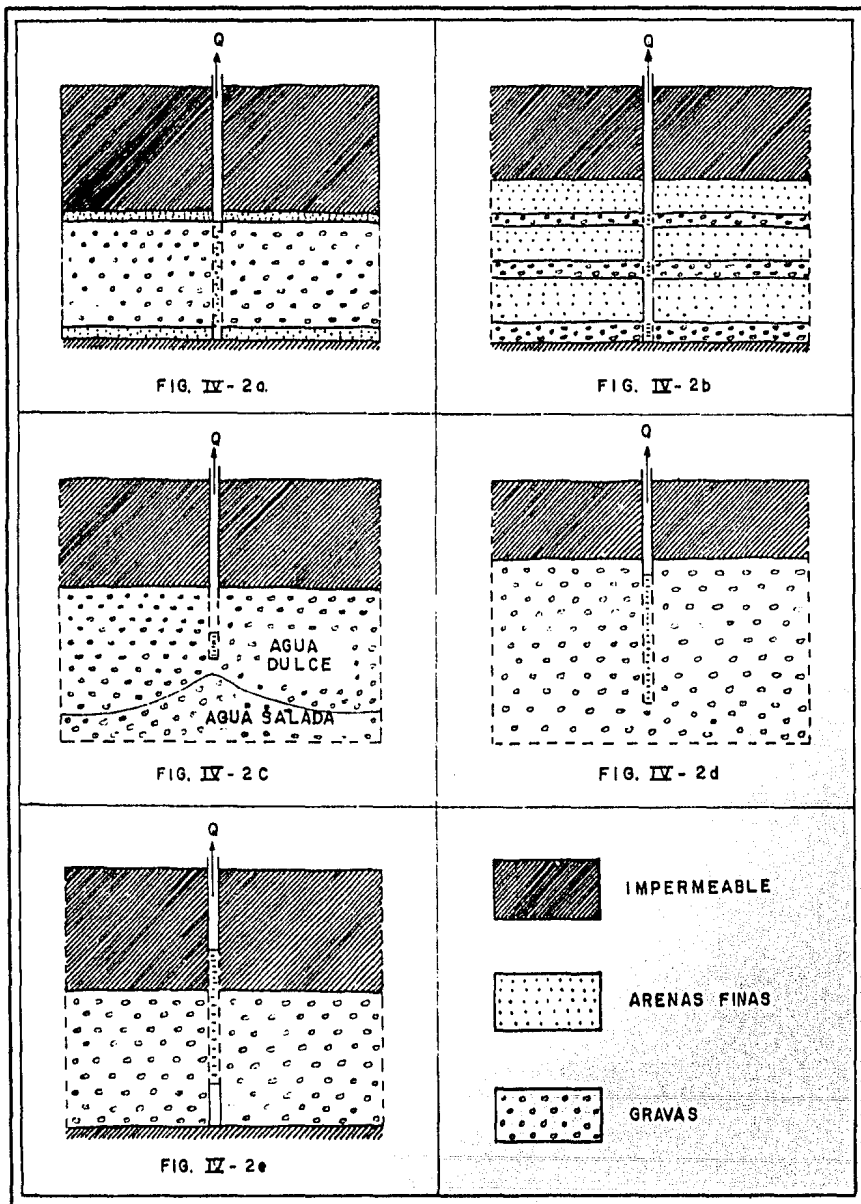


FIG. IV - 2 EFECTOS DE LA PENETRACION PARCIAL

En la porción de acuífero no penetrado por el pozo de bombeo el agua recorre trayectorias de mayor longitud para entrar al cedazo; por consiguiente, las pérdidas de carga en la formación son mayores en este sistema que en el de penetración total. En otras palabras, los abatimientos en un pozo parcialmente penetrante son mayores que los provocados en otro totalmente penetrante, para un mismo caudal de extracción, aumentando el abatimiento conforme disminuye la penetración del pozo.

En las proximidades de estos pozos el flujo es tridimensional; por ello, el abatimiento registrado en el pozo de bombeo y en pozos de observación próximos a él, depende, entre otros factores, de la longitud y posición de los cedazos. Esto complica la interpretación de las pruebas de bombeo, ya que los abatimientos son función también de las características constructivas de los pozos. Para simplificar la interpretación es conveniente ubicar los pozos de observación a distancias equivalentes al espesor del acuífero, o mayores, para las cuales el efecto de penetración es mínimo o nulo.

Para dar una idea aproximada de la disminución de la eficiencia hidráulica del pozo causada por la penetración parcial, considérese que si un pozo capta sólo la mitad del espesor saturado de un acuífero el abatimiento provocado en él será algo menor que el doble del provocado en un pozo totalmente penetrante, para el mismo caudal de bombeo. Si se considera ahora un mismo abatimiento, el caudal que puede proporcionar un pozo es tanto menor cuanto menor es la penetración de su cedazo.



#### IV-6. Conceptos de régimen permanente y régimen no permanente.

Cuando se inicia el bombeo a caudal constante en un pozo, y en general en cualquier tipo de captación, en los primeros instantes se extrae agua del almacenamiento en los alrededores del pozo, gracias al descenso del nivel producido. Poco a poco el cono de influencia va extendiéndose de forma que la cantidad de agua producida a consecuencia del descenso de nivel iguale a la extraída por el pozo. En igualdad de otras condiciones la velocidad de expansión y extensión del cono es mucho más rápida en un acuífero cautivo que en un acuífero libre de acuerdo con el diferente orden de magnitud del coeficiente de almacenamiento. El período durante el cual los descensos, van aumentando se llama régimen no permanente.

En un acuífero que no puede recibir agua del exterior tal como sucede en un acuífero perfectamente cautivo o en un acuífero libre en ausencia de aportes de agua de lluvia o agua superficial, todo el caudal extraído por el pozo -- debe proceder del almacenamiento y por lo tanto el régimen es siempre no permanente. Sin embargo, y debido a la superficie creciente del cono de influencia, si el acuífero es de extensión muy grande (infinito a efectos prácticos), la velocidad de descenso va disminuyendo paulatinamente hasta que llega un momento en que es tan lento que se puede ---- aceptar a efectos prácticos que los descensos se han estabilizado y entonces se dice que ha alcanzado un régimen -- casi permanente.

#### IV-7. Relación de la Ley de Darcy y la Ecuación de Thiem

La figura IV-3 representa la mitad de la sección transversal del cono de depresión que se ha desarrollado en un acuífero libre alrededor de un pozo A, el cual ha sido bombeado a caudal constante ( $Q$ ) durante tiempo suficiente para que el régimen permanente se pueda considerar establecido para efectos prácticos, o al menos para que la cantidad de agua que todavía proceda del almacenamiento se pueda considerar despreciable comparada con la cantidad de agua que esta fluyendo hacia el pozo.

La base del acuífero y la superficie freática en su estado inicial se suponen horizontales y el material razonablemente homogéneo. En base a la ley de continuidad, a partir del momento en que el cambio en el almacenamiento sea despreciable comparado con el caudal de bombeo ( $Q$ ) en el pozo A, los caudales que pasan en el flujo radial hacia A, a través de secciones definidas dentro del cono de depresión por los cilindros concéntricos, son virtualmente iguales al caudal ( $Q$ ).

En la figura IV-3, las distancias del pozo de bombeo a los pozos de observación B y C definen los radios de los cilindros concéntricos  $r_1$  y  $r_2$  y al mismo tiempo representan las generatrices de los cilindros cuyas superficies laterales constituyen las secciones de paso de los caudales ( $Q_1$ ) y ( $Q_2$ ); en resumen tenemos que  $(Q) = (Q_1) = (Q_2)$ .

Aunque en la figura IV-3 se representa esquemáticamente un acuífero libre, el método siguiente es aplicable también a un acuífero confinado.

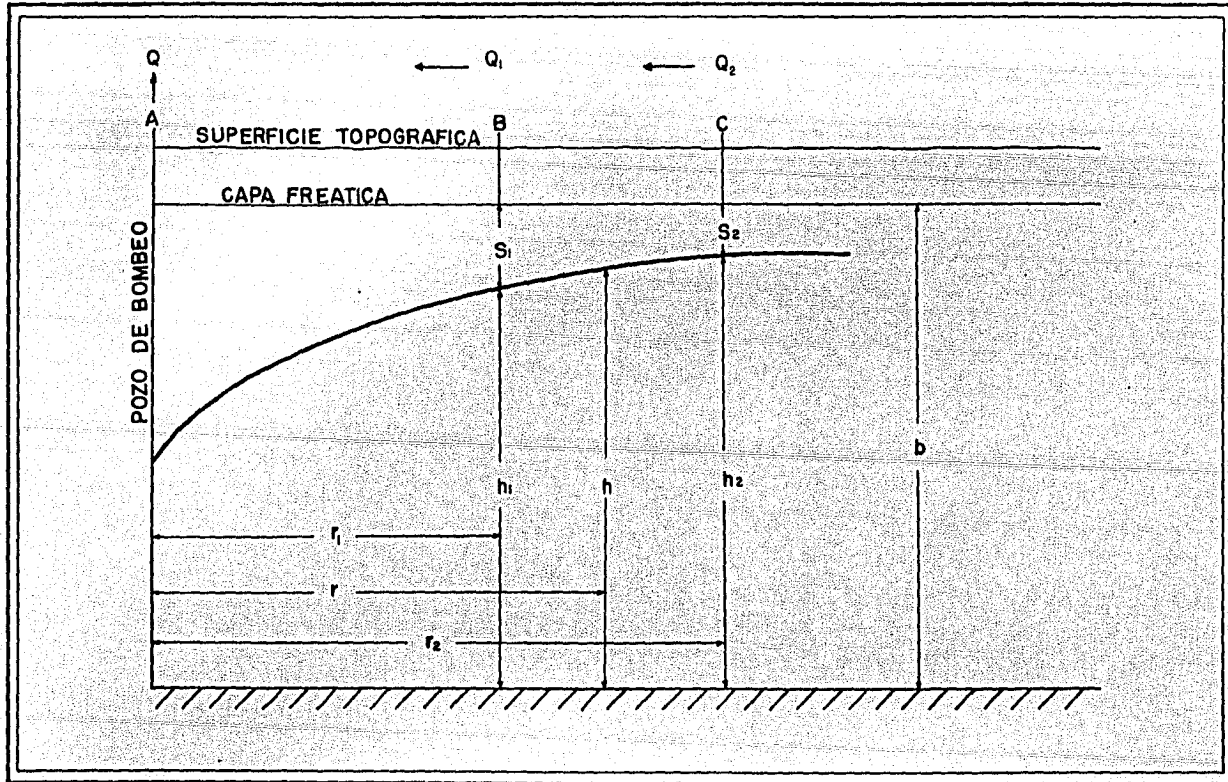


FIG. IV-3 SECCION TRANSVERSAL DEL CONO DE DEPRESION PROVOCADO POR UN POZO (A) AL BOMBEAR EN UN ACUIFERO LIBRE

Bajo las condiciones expuestas en el apartado IV-7, la Ley de Darcy puede expresarse en coordenadas cilíndricas como una ecuación diferencial de primer orden:

$$Q = -AK \frac{dh}{dr} \quad \left[ L^3 T^{-1} \right] \quad \text{Ley de Darcy} \quad (1)$$

sustituyendo  $A = 2\pi rh$

$$Q = -K2\pi rh \frac{dh}{dr}$$

en donde separando variables

$$Q \frac{dr}{r} = -2\pi Kh dh$$

e integrando entre  $r_1$  y  $r_2$ ,  $h_1$  y  $h_2$

$$Q \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = -2\pi K \int_{h_2}^{h_1} h dh$$

tenemos,

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

cambiando a logaritmos vulgares y despejando Q, tenemos

$$Q = - \frac{\pi K (h_1^2 - h_2^2)}{2.30 \log r_1/r_2} \quad \left[ L^3 T^{-1} \right] \quad (2)$$

La expresión anterior, sirve para calcular el gasto en un acuífero libre, y para un acuífero confinado se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = - \frac{2 \pi K b (h_1^2 - h_2^2)}{2.30 \log r_1/r_2} \quad \left[ L^3 T^{-1} \right] \quad (3)$$

en donde,

$Q$  = Caudal de bombeo constante, en  $L^3 T^{-1}$

$K$  = coeficiente de permeabilidad, en  $L T^{-1}$

$b$  = espesor del acuífero, en  $L$

$h_1$  y  $h_2$  = son elevaciones del nivel del agua a las --  
distancias  $r_1$  y  $r_2$  del pozo de bombeo, res-  
pectivamente, en  $L$

$r_1$  y  $r_2$  = distancia radial desde el centro del pozo  
de bombeo al punto en que se mide el abati-  
miento, en  $L$

El origen de tiempos se tomará en el momento de ini-  
ciarse el bombeo y el origen de distancias horizontales --  
será el eje del pozo. Todos los niveles del agua, cuando --  
sea preciso especificarlo, irán referidos a la base del --  
acuífero, que será el origen de distancias verticales.

IV-8. Teorías de la hidráulica de pozos completos a caudal constante y en régimen permanente.

HIPOTESIS BASICAS DE LA ECUACION DE THIESS

- 1). El acuífero es homogéneo e isótropo en el área afectada por el bombeo.
- 2). El espesor del acuífero es constante (acuífero confinado) o el espesor saturado inicial es constante antes de iniciar el bombeo (acuífero libre).
- 3). El pozo es totalmente penetrante.
- 4). La superficie piezométrica o freática es horizontal antes de iniciarse el bombeo.
- 5). El abatimiento en las proximidades del pozo no varía en el tiempo.
- 6). El pozo de bombeo es cien por ciento eficiente.
- 7). A través del acuífero y dentro del radio de influencia del pozo, existe flujo laminar.
- 8). El cono de depresión ha alcanzado el equilibrio de modo que tanto el abatimiento como el radio de influencia del pozo, no sufren cambio alguno a través del tiempo en que se continúe bombeando a caudal constante.

Estos supuestos son bastante restrictivos, pero en la práctica son admisibles desviaciones pequeñas sin invalidar la formulación a la que se llega.

#### IV-8.1 Pozos en acuíferos confinados

##### METODO DE THIEM

La ecuación (3) se conoce con el nombre de ecuación de equilibrio o de Thiem. Esta ecuación permite obtener el valor de  $Q$  si se conoce  $K$ , y recíprocamente, si previamente se han medido los valores de  $h$  o de  $s$  en dos pozos de observación. Si tales pozos están situados a distancias respectivas  $r_1$  y  $r_2$  del pozo de bombeo y  $h_1$  y  $h_2$  son los niveles medidos, se cumple que:

$$K = - \frac{2.30 \cdot Q}{2\pi b (h_2 - h_1)} \log r_2/r_1 \quad [LT^{-1}] \quad (4)$$

y, siendo  $T = K \cdot b$ , puede escribirse para  $T$ , la siguiente expresión que representa la ecuación de Thiem para calcular la transmisibilidad de un acuífero

$$T = - \frac{2.30 \cdot Q}{2\pi (h_2 - h_1)} \log r_2/r_1 \quad [L^2 T^{-1}] \quad (5)$$

Las ecuaciones (4) y (5) se aplican en acuíferos confinados y en acuíferos libres donde los descensos se pueden considerar despreciables comparados con su gran espesor saturado.

Los pozos de observación deben estar suficientemente cerca del pozo de bombeo como para que se tengan descensos significativos y convenientemente medibles.

IV-8.2 Pozos en acuíferos libres  
CORRECCION DE C.E. JACOB

Los acuíferos libres se caracterizan por estar limitados superiormente por una superficie freática; puesto que el espesor saturado del acuífero varía con las fluctuaciones de esta superficie, la transmisibilidad del acuífero es también variable en el área y en el tiempo. Si las fluctuaciones de los niveles son poco significativos con respecto al espesor del acuífero, la transmisibilidad puede suponerse constante, y la interpretación se efectúa como si se tratara de un acuífero confinado. En cambio, si dichas fluctuaciones son importantes (mayores del 20% del espesor saturado del acuífero), Jacob mostró como deben corregirse los descensos ( $s_1$  y  $s_2$ ) para obtener los valores que habrían sido observados sino hubiera existido disminución del espesor saturado. Haciendo la consideración de que:

$$s_c = s - \frac{s^2}{2b} \quad [L] \quad (6)$$

siendo,

$s_c$  = Abatimiento corregido, en L

$s$  = abatimiento obtenido a partir de la prueba de bombeo, en L

$b$  = espesor saturado inicial del acuífero, en L

Los abatimientos así corregidos, se interpretan como si se tratara de un acuífero confinado.



IV-9. Teorías de la hidráulica de pozos completos a caudal constante y en régimen no permanente.

HIPOTESIS BASICAS DE LA ECUACION DE THEIS

- 1). El acuífero es homogéneo e isótropo.
- 2). El espesor saturado del acuífero es constante.
- 3). El pozo de bombeo penetra totalmente y recibe -- agua de todo el espesor saturado del acuífero.
- 4). El acuífero libera el agua instantáneamente al -- abatirse la superficie piezométrica.
- 5). El acuífero es de una extensión lateral infinita.
- 6). El caudal bombeado procede del almacenamiento -- del acuífero.

Estas suposiciones son esencialmente las mismas que corresponden a las fórmulas de equilibrio, excepto que los niveles del agua dentro del área del cono de depresión, no necesitan haberse estabilizado o alcanzado el equilibrio.

#### IV-9.1 Pozos en acuíferos confinados

##### METODO DE C.V. THEIS

El movimiento radial hacia un pozo ubicado en un acuífero confinado, fue investigado por C.V. Theis en 1935 a partir de la analogía que presenta la conducción de calor por una placa en la que existe un sumidero. La fórmula de Theis fue la primera que tuvo en cuenta el efecto del tiempo de bombeo en la descarga. Su derivación constituyó un avance notable en el campo de la hidráulica de aguas subterráneas\*, haciendo posible predecir el abatimiento para cualquier tiempo de bombeo, determinar la transmisibilidad y el coeficiente de almacenamiento antes de presentarse la estabilización de los niveles piezométricos en los pozos de observación. Dichos coeficientes del acuífero se pueden determinar a partir de las mediciones (tiempo-abatimiento) realizadas en un sólo pozo de observación distinto del pozo de bombeo o en el mismo pozo de bombeo, en lugar de tener que utilizar dos pozos de observación, como lo exigen las fórmulas utilizadas en el régimen permanente.

La solución de la ecuación de Theis que a continuación se presenta esta basada en las hipótesis descritas en el apartado IV-9. De acuerdo a la figura IV-4 se deduce que:

$$dQ = - S_r d\theta dr \frac{\partial h}{\partial t}$$

\* Captación de Aguas Subterráneas de Alberto Benítez

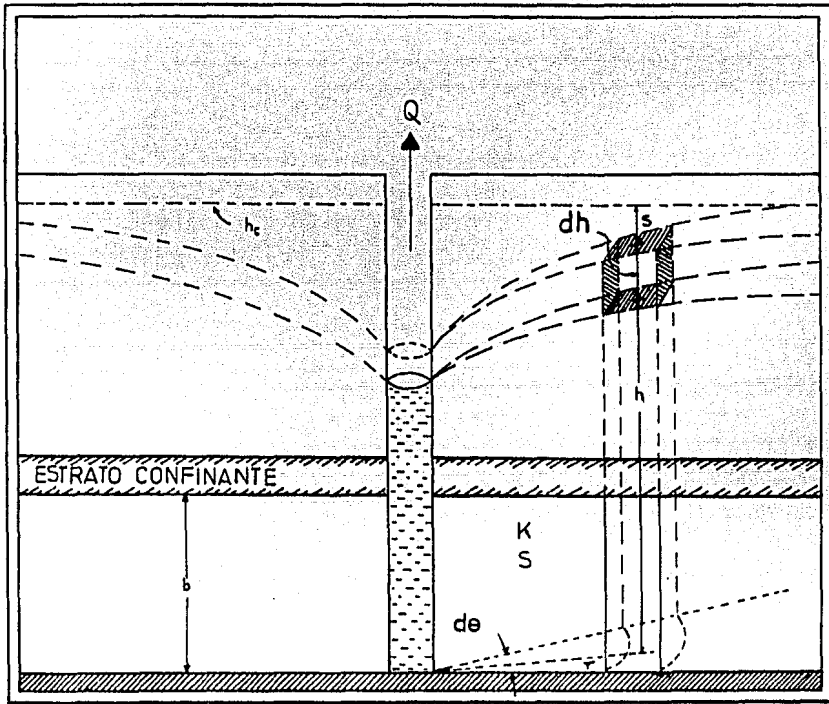


FIG.IV-4 MOVIMIENTO EN REGIMEN NO PERMANENTE EN UN ACUIFERO CONFINADO

y en general

$$Q(t) = -s \int_{r_w}^{\infty} \int_0^{2\pi} r \frac{\partial h(r, \theta, t)}{\partial t} d\theta dr$$

En el caso de un acuífero de extensión infinita explotado por un pozo único, la distribución de los niveles --- tiene simetría radial, y por ello

$$Q = - 2\pi S \int_{r_w}^{\infty} r \frac{\partial h(r,t)}{\partial t} dr$$

De esta ecuación resulta evidente que si el pozo bombea a caudal constante (Q) y si se admite que (S), en primera -- aproximación permanece constante durante el bombeo, para -- que la integral se mantenga constante la variación del nivel piezométrico debe decrecer con continuidad a medida -- que el área afectada por el bombeo aumente (función del -- tiempo); en consecuencia, no puede existir movimiento es-- tacionario en un acuífero confinado de extensión infinita.

teniendo en cuenta las condiciones de contorno

$$\left. \begin{array}{l} h \rightarrow h_0 \quad \text{cuando } r \rightarrow \infty \\ \lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{Q}{2\pi T} \end{array} \right\} \text{ para } t > 0$$

y la condición inicial

$$h(r,0) = h_0 \quad \text{para } t \leq 0$$

condición que significa que, en el acuífero, el nivel era

constante hasta el instante en que se inició el bombeo. La solución es:

$$h = h_0 - \frac{Q}{4\pi T} \int_{\frac{r^2 S}{4Tt}}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (7)$$

La integral exponencial de la ecuación (7) puede desarrollarse en serie convergente, por lo que el descenso se puede escribir como  $s = h_0 - h$ , para así obtener:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (7a)$$

donde,

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

donde,

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (8)$$

Wenzel da una tabla de la integral exponencial representada simbólicamente como  $W(u)$ , o función de pozo, para

valores de  $u$  comprendidos entre  $10^{-15}$  y 9.9 y, cuyos valores se presentan en la tabla IV-1, pudiéndose también calcular mediante el uso de computadora.

Para valores dados de  $u$  y  $W(u)$ , podemos obtener la transmisibilidad ( $T$ ) a partir de la ecuación (7a)

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) \quad \left[ L^2 T^{-1} \right] \quad (9)$$

cuyos términos significan,

$T$  = Transmisibilidad, en  $L^2 T^{-1}$

$Q$  = caudal del pozo de bombeo, en  $L^3 T^{-1}$

$s$  = descenso producido por el bombeo de un pozo a caudal constante, medido en un pozo de observación o en el mismo pozo de bombeo, en  $L$

$W(u)$  = función  $u$  de pozo

Y despejando el coeficiente de almacenamiento ( $S$ ), de la ecuación (8)

$$S = \frac{4Ttu}{r^2} \quad \left[ \text{Adimensional} \right] \quad (10)$$

cuyos términos significan,

$S$  = Coeficiente de almacenamiento, adimensional

$T$  = Transmisibilidad, en  $L^2 T^{-1}$

$t$  = tiempo transcurrido desde que se inicio el bombeo, en T

$r$  = distancia desde el centro del pozo de bombeo al punto en que se mide el abatimiento, en L

No es posible el cálculo directo con el empleo de las ecuaciones (9) y (10). Sin embargo el mismo Theis desarrollo un método gráfico de solución, que permite encontrar T y S si se conocen los valores de los otros términos y cuyo método a continuación se describe:

#### METODO GRAFICO - NUMERICO DE THEIS

- 1). Representar en papel logarítmico  $W(u)$  en función de  $1/u$ . Esta representación, se le conoce como - CURVA TIPO, se prepara a partir de los valores - de la tabla IV-1 y se encuentra representada en la lámina 1.
- 2). A continuación, en papel doble logarítmico del mismo módulo que el empleado para la curva tipo, se representan los abatimientos en función del - tiempo, de acuerdo a los datos obtenidos de la - prueba de bombeo realizada en un pozo de bombeo o de observación, según sea el caso.

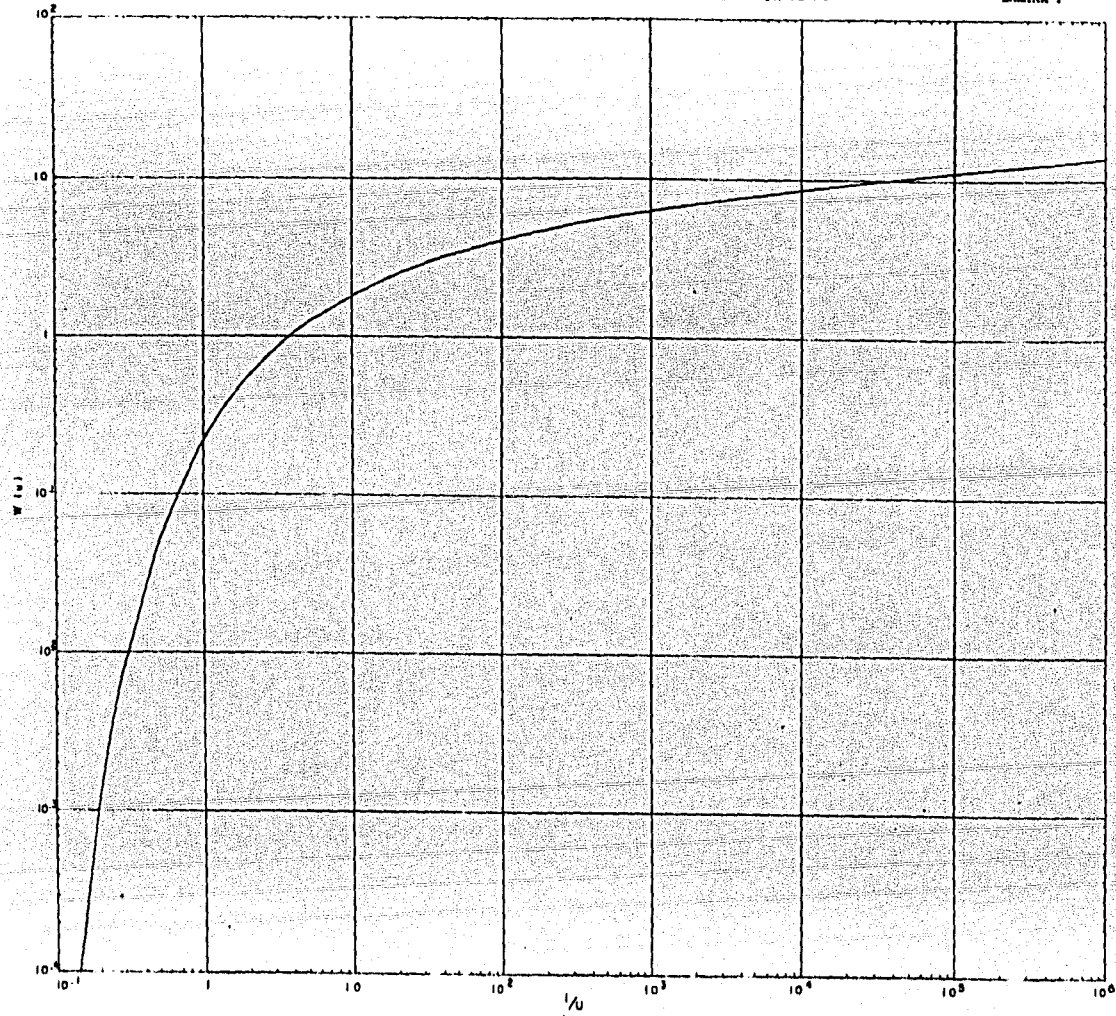
- 3). Superponer la curva de los datos obtenidos en el campo con la curva tipo manteniendo los ejes de coordenadas paralelos y de manera que los datos se ajusten lo mejor posible a dicha curva tipo.
- 4). Se elige arbitrariamente un punto común, o punto de ajuste, sobre la parte superpuesta de ambas curvas. Para facilitar los cálculos se recomienda elegir un punto cuyas coordenadas en la curva -- tipo sean  $W(u) = 1$ ;  $u = 1$ . En los casos que esto no sea viable, los valores convenientes son las potencias de diez.
- 5). Las coordenadas de este punto de ajuste  $s$ ,  $t$ ,  $u$  y  $W(u)$ , leídas en las láminas correspondientes y sustituidas en las ecuaciones (9) y (10), nos -- permite calcular  $T$  y  $S$  a partir de éstas.

En general, debe darse menor peso a los puntos correspondientes a los tiempos más cortos, pues en esta parte de la prueba pueden tenerse las mayores discrepancias entre -- las condiciones reales y las hipótesis establecidas para -- obtener la fórmula. Para tiempos mayores de bombeo, estas discrepancias se van minimizando y se tiene un mejor ajuste entre la teoría y las condiciones reales.





114



CURVA TIPO DE  $W(u)$  VERSUS  $1/u$

#### IV-9.2 Pozos en acuíferos libres

##### METODO DE THEIS

Si los descensos no son grandes en relación con el espesor saturado del acuífero y si el drenaje es instantáneo y proporcional al descenso producido, en principio se pueden aplicar las mismas fórmulas de los acuíferos confinados. Pero si los descensos son grandes en comparación con el espesor pueden corregirse los descensos con ayuda de la ecuación (6). En este tipo de acuíferos el coeficiente de almacenamiento es virtualmente igual al rendimiento específico ya que la mayor parte del agua extraída del almacenamiento es drenada por gravedad y sólo un volumen muy pequeño proviene de la compresión del acuífero y de la expansión del agua. El coeficiente de almacenamiento en acuíferos libres esta comprendido entre 0.1 y 0.3.

El rendimiento específico está determinado por la parte de la cantidad de agua contenida en el material portador que es drenada por gravedad cuando el nivel freático desciende una unidad y se representa por la ecuación:

$$S_y = \frac{V_g}{V} \quad \left[ \text{Adimensional} \right] \quad (11)$$

en donde,

$S_y$  = Rendimiento específico

$V_g$  = volumen de agua drenada por gravedad

$V$  = volumen de agua total

#### IV-9.3 Pozos en acuíferos confinados

##### APROXIMACION LOGARITMICA DE C.V. JACOB

Un método más sencillo y muy utilizado para la interpretación de las pruebas de bombeo, fué desarrollado por C.V. Jacob, quien llegó a la conclusión de que cuando el valor de  $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$  es aproximadamente igual o menor que 0.01, la fórmula de régimen no permanente de Theis, ecuación (7), puede sustituirse, sin cometer error, por las siguientes expresiones:

Ecuación para calcular la transmisibilidad a partir de varios pozos de observación:

$$T = \frac{0.183 \cdot Q}{\Delta s / \Delta \log_{10} t / r} \left[ L^2 T^{-1} \right] \quad (12)$$

Ecuación para el cálculo de la transmisibilidad a partir de un pozo de bombeo u observación:

$$T = \frac{0.183 \cdot Q}{\Delta s / \Delta \log_{10} t} \left[ L^2 T^{-1} \right] \quad (13)$$

Para calcular valores de "u" menores de 0.05, las fórmulas anteriores conducen prácticamente a los mismos resultados que la ecuación (7). El valor de "u" se vuelve menor conforme aumenta t y disminuye r.

A partir de estas fórmulas, desarrolló el método gráfico de interpretación que lleva su nombre, y que consta de los siguientes pasos:

## METODO GRAFICO - NUMERICO DE JACOB

- 1).- Se construye un gráfico de abatimiento-tiempo - en papel semilogarítmico. El abatimiento se traza en la escala aritmética vertical y el tiempo se sitúa en la escala logarítmica horizontal.
- 2).- Pasar una recta por los puntos que se alinean, y determinar su pendiente. Los puntos correspondientes a los primeros minutos de la prueba se apartan generalmente de la recta, debido a que corresponden a tiempos cortos ( $t < 5r^2/ST$ ) para los cuales no es válida la fórmula de Jacob.
- 3).- Si la pendiente de la recta es ( $\Delta s$ ), considerando un incremento logarítmico del tiempo  $\Delta \log t = 1$ , en los casos que no sea factible, son valores - convenientes las potencias de diez; al sustituir el valor de la pendiente ( $\Delta s$ ) en la ecuación -- (13) obtendremos la transmisibilidad (T).
- 4).- Al dibujar los datos de la solución rectilínea de la ecuación (13) es conveniente incluir el - origen de la escala aritmética que representa - la línea de los abatimientos nulos. Si situamos esta línea en la parte superior del gráfico, la representación de los abatimientos aumenta en - el mismo sentido (hacia abajo) en que lo hace - el pozo. Prolongando la línea recta hasta que -

corte el eje de los abatimientos nulos se puede calcular el valor del coeficiente de almacenamiento a partir del valor definido por la abscisa del punto de intersección para  $t_0$  ; sustituyendo este valor en la expresión:

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \quad \left[ \text{Adimensional} \right] \quad (14)$$

en donde,

S = coeficiente de almacenamiento

T = transmisibilidad del acuífero

$t_0$  = tiempo correspondiente a la intersección de la recta del gráfico, con el eje de abatimiento nulo.

r = distancia del pozo de bombeo al pozo de observación en que se han medido los abatimientos.

El mismo método puede seguirse cuando se conocen los abatimientos en varios pozos de observación para diferentes tiempos. En este caso se gráfica el abatimiento ( escala aritmética ) contra los valores de la relación  $t/r^2$  ( escala logarítmica ), y se sigue la secuencia descrita anteriormente, pero los coeficientes buscados se obtienen a partir de las ecuaciones (12) y (14).

IV-9.4 Pozos en acuíferos semiconfinados  
METODO DE WALTON - HANTUSH

Probablemente, el acuífero más común en la naturaleza es el de tipo semiconfinado; los rellenos siempre tienen cierta estratificación, alternándose estratos de granulometría variada. Cuando un estrato de material permeable queda verticalmente por materiales, también saturados, de menor permeabilidad, se tiene un acuífero semiconfinado como se ilustra en la figura IV-5.

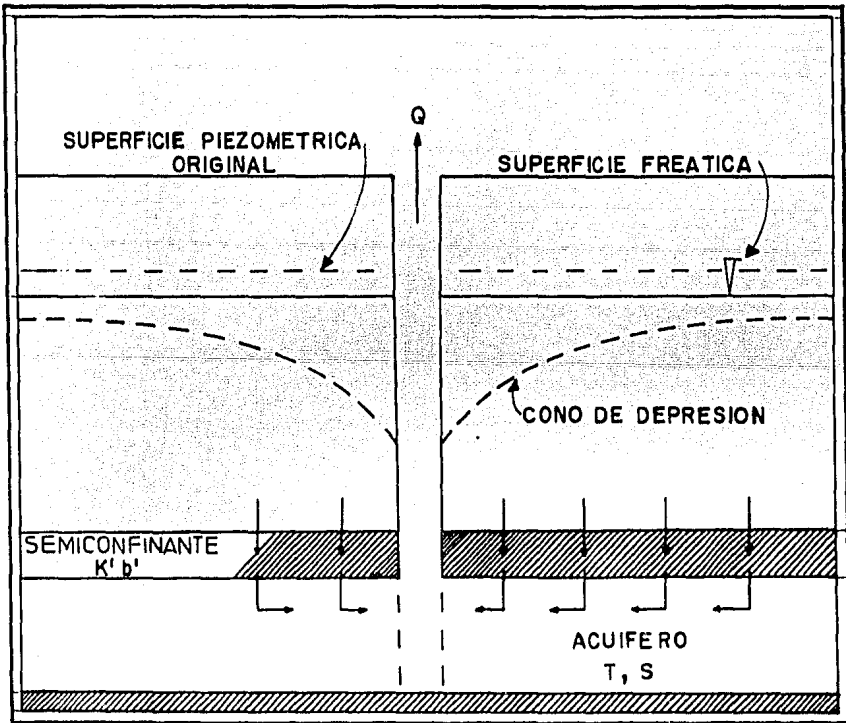


FIG. IV-5 POZO EN ACUIFERO SEMICONFINADO

Al bombear un acuífero semiconfinado se provocan abatimientos de sus niveles piezométricos, generándose una diferencia vertical de cargas, que induce el flujo descendente del agua a través del semiconfinamiento. La cantidad de agua que circula a través de éste es directamente proporcional a la diferencia de cargas entre la superficie freática y la superficie piezométrica, e inversamente proporcional a la resistencia hidráulica del mismo estrato.

Puesto que en este sistema sólo una parte del volumen bombeado procede del acuífero, y el resto es aportado por el estrato adyacente al semiconfinante, el abatimiento de los niveles piezométricos es menor que en el caso del acuífero confinado. Como la aportación vertical aumenta con el tiempo el abatimiento de los niveles piezométricos va decreciendo hasta que la aportación vertical equilibra al caudal de extracción; y en ese momento, los niveles piezométricos se estabilizan.

La solución correspondiente a este sistema es la siguiente:

$$T = \frac{Q}{4\pi s} H(u, B) \quad \left[ L^2 T^{-1} \right] \quad (15)$$

en donde,

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad , \quad B = \sqrt{\frac{T}{K'/b'}}$$

siendo  $K'$  la permeabilidad vertical y  $b'$  el espesor del estrato semiconfinante.

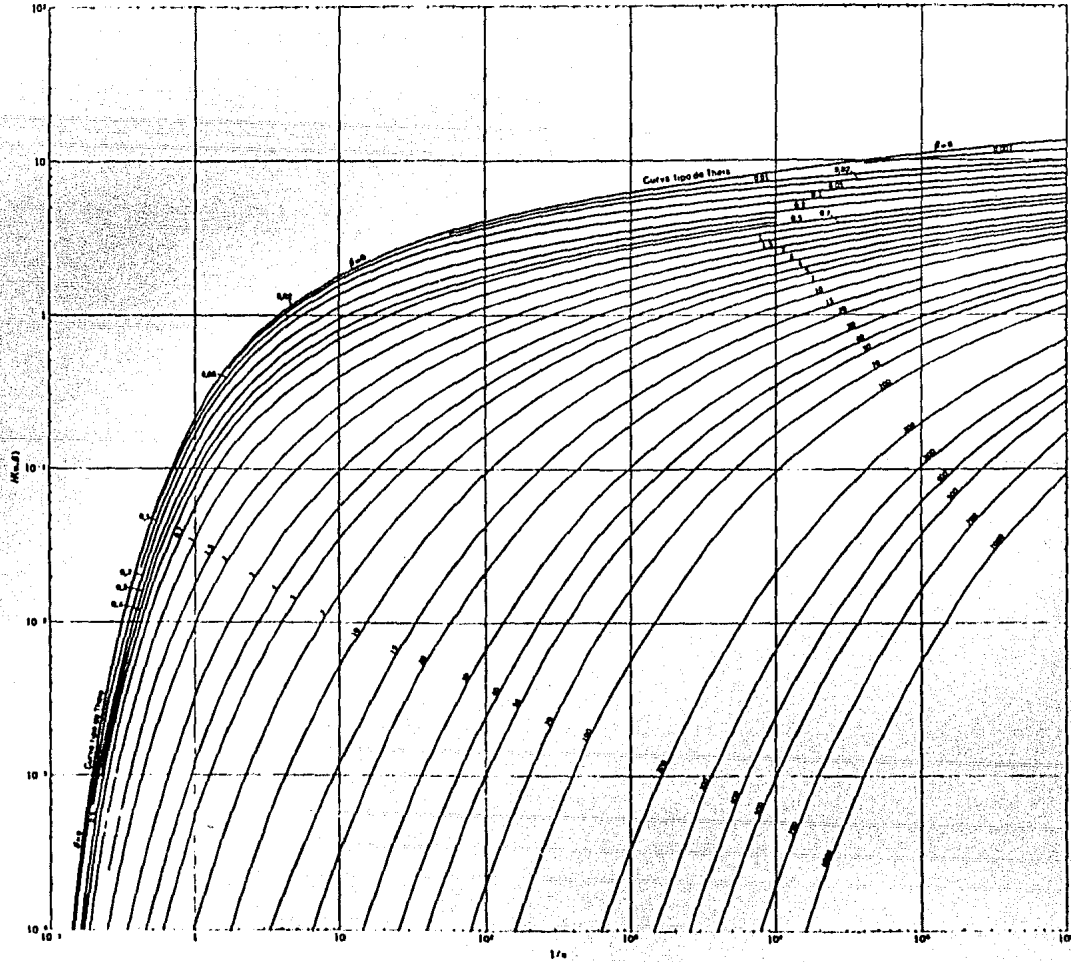


El manejo de la ecuación (15) es muy similar al de la curva de Theis, siendo el procedimiento:

#### METODO GRAFICO - NUMERICO DE HANTUSH

- 1). La lámina 2 es una representación gráfica en -- papel doble logarítmico de  $H(u,B) - 1/u$ , tomando como parámetro B.
- 2). A continuación se representan los valores de abatimiento en función del tiempo, empleando papel logarítmico del mismo módulo que el utilizado -- para las series de curvas tipo.
- 3). Se superpone la curva de campo al conjunto de -- curvas tipo manteniendo el paralelismo entre los respectivos ejes de coordenadas, de forma que la curva de campo se ajuste a la curva tipo correspondiente a un valor de B dado, o pueda interpolarse entre dos de tales curvas.
- 4). El punto de ajuste se elige arbitrariamente sobre la porción superpuesta de las láminas, y sus --- coordenadas son  $H(u,B)$ ,  $1/u$ ,  $s$  y  $t$ , las cuales -- conjuntamente con el valor concreto de B correspondiente a la curva tipo que se ajuste a la de datos, se sustituyen en las ecuaciones (8) y (15) que nos permiten calcular S y T.

122



FAMILIA DE CURVAS TIPO DE  $1/u$  VERSUS  $H(u, \beta)$ , PARA DIFERENTES VALORES DE  $\beta$

Segun E. J. McElroy Métras en publicaciones 19611

IV-9.5 Método para el cálculo aproximado del Coeficiente de Almacenamiento

Quando las pruebas de bombeo aportan escasos o dudosos datos para estimar el coeficiente de almacenamiento, podemos hacer uso de la siguiente relación empírica para su cálculo:

b (metros)	S (adimensional)	$\frac{S}{b}$ (metros <sup>-1</sup> )
1 .....	$3.28 \times 10^{-6}$	
10 .....	$3.28 \times 10^{-5}$	
100 .....	$3.28 \times 10^{-4}$	$3.28 \times 10^{-6}$
1000 .....	$3.28 \times 10^{-3}$	

Basta multiplicar el espesor en metros por  $3.28 \times 10^{-6}$  o simplemente interpolar entre los valores dados en las dos primeras columnas. Los valores así estimados no son absolutamente correctos, ya que no se tienen en cuenta cambios en la porosidad o en la compresibilidad del acuífero, pero son razonablemente fiables para la mayoría de los objetivos perseguidos. Tales estimaciones pueden perfeccionarse recurriendo a la comparación con valores obtenidos de ensayos de bombeo o de flujo, extrapolando después los resultados a otras zonas del acuífero y teniendo en cuenta los ajustes necesarios para espesores diferentes.

#### IV-10. Aplicación de las Teorías de Theis y Jacob en la zona de Calera de Victor Rosales, estado de Zacatecas

En este capítulo se expusieron algunas de las más importantes teorías para calcular los parámetros hidrogeológicos más representativos de los acuíferos, de éstas teorías únicamente fue posible aplicar a un problema real los métodos de Theis y Jacob, debido a los escasos datos que a respecto existen. Dicha información fue proporcionada por la Subdirección de Geohidrología y de Zonas Aridas dependiente de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, y corresponde a la zona de Calera de Victor Rosales ubicada en el estado de Zacatecas.

##### IV-10.1 Localización de la zona de Calera de Victor Rosales

En la zona comprendida por el estudio se definen dos cuencas en las que se ubican los valles de Calera y Benito Juárez. Dicha zona de Calera se encuentra enclavada en la porción central del estado de Zacatecas, comprendiendo una extensión del orden de 2,081 Km<sup>2</sup> y esta limitada al oriente por la Sierra Madre Oriental y la Meseta Central, al poniente por la zona desértica de Sonora y por la llanura costera de Sinaloa. Al norte con la Meseta Central y al Sur se une a la zona montañosa de la costa Suroeste y a la zona de Fosas Tectónicas.

Cuenta con importantes vías de comunicación como es la carretera No. 45 que atraviesa la zona de sur a norte y

que une las poblaciones de Zacatecas y Fresnillo; a esta carretera entronca la No. 54, que comunica la zona con las ciudades de Guadalajara, Saltillo y Monterrey. Por vía férrea el ferrocarril México-Ciudad Juárez cruza a la zona de sur a norte comunicando las ciudades de Zacatecas y --- Fresnillo. Finalmente la comunicación por vía aérea se realiza por medio del aeropuerto de alcance medio, ubicado al sur de Calera de Victor Rosales que proporciona servicio a la Ciudad de Zacatecas.

Observece la figura IV-6, donde se aprecia gráficamente la localización de la zona de estudio.

#### IV-10.2 Antecedentes

La zona de Calera es una de las regiones agrícolas -- más importantes del estado de Zacatecas, el desarrollo que ha tenido en las últimas décadas se debe primordialmente -- al establecimiento de la agricultura bajo riego, misma que se sustenta en el aprovechamiento de los acuíferos, debido a que existen pocos aprovechamientos superficiales en la -- zona. La demanda para uso doméstico e industrial es menos elevada comparada con la que se destina al uso agrícola.

La presencia de los niveles someros que la porción -- norte presenta formando pequeñas lagunas y la obtención de altos caudales en las captaciones que se construyen, fueron los elementos que conforman la idea de una aparente alta -- disponibilidad de agua subterránea, dando por resultado -- que rápidamente se extrajera un volumen superior a la recarga natural que recibían los acuíferos, iniciándose con

# LOCALIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO

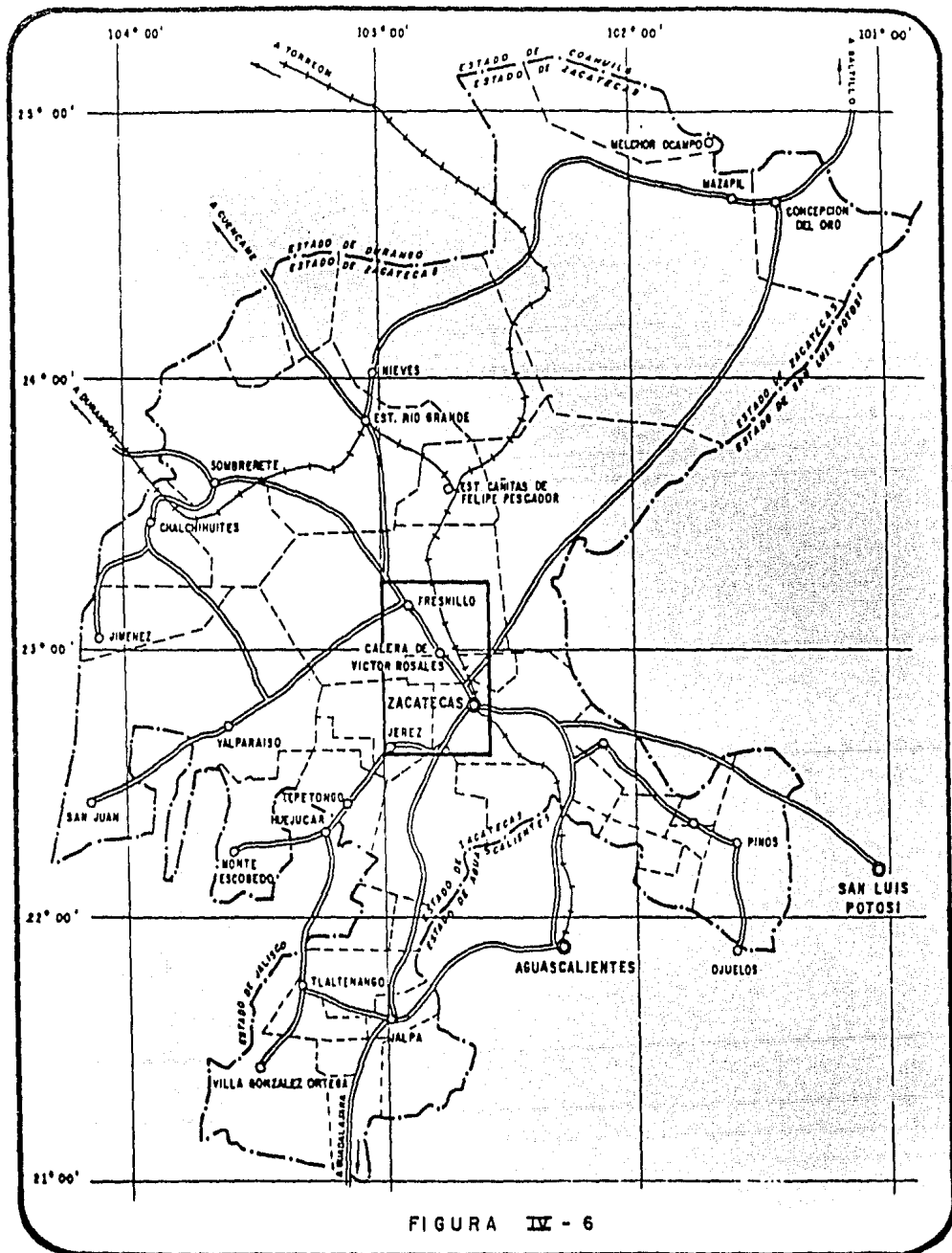


FIGURA IV - 6

su sobreexplotación; así mismo la excesiva concentración de las captaciones provocó un descenso acelerado de los niveles estáticos en esta porción del acuífero. Debido a lo anterior, fue necesario realizar un estudio detallado de la zona, donde se incluyen las pruebas de bombeo, para conocer las condiciones actuales en que se encuentra ésta y así proporcionar datos que nos ayuden a evitar que se siga sobreexplotando el acuífero.

#### IV-10.3 Uso del agua potable

Calidad del agua para uso potable. Las normas o límites permisibles para agua potable, indican que esta debe de contener menos de 1000 PPM de sales, menos de 250 PPM de calcio, bicarbonatos y sulfatos, y menos de 125 PPM de magnesio. Comparando los resultados de los análisis químicos con las normas de calidad mencionadas, se encontró que el agua del valle de Calera tiene una concentración salina de 309 a 339 PPM y que en el valle de Benito Juárez el contenido de sólidos totales disueltos varía de 428 a 506 PPM, considerándose para ambos valles una buena calidad del agua, su uso es aceptable para el abastecimiento humano.

Calidad del agua para uso agrícola. En relación con su uso en la agricultura se observó que el agua contiene carbonato de sodio residual y porcentaje de sodio. No obstante se consideran apropiadas para uso agrícola, aunque sus concentraciones se encuentren muy cercanos al límite permitido.

#### IV-10.4 Aprovechamientos Superficiales

Los escurrimientos que se originan dentro del área -- son de carácter torrencial, presentando por tanto, escurrimientos solamente durante el período de lluvias, debido a esto no existen obras importantes para su aprovechamiento, la principal es la presa que sobre el arroyo Malpaso se -- construyó para controlar el escurrimiento de éste. El resto de los aprovechamientos que se han construido se reducen -- a pequeños bordos de almacenamiento sobre algunos de los -- arroyos con fines de riego o abrevaderos.

El valle de Calera ocupa la mayor parte de la zona y superficialmente drena hacia el norte, rumbo a la laguna -- de Santa Ana localizada en el extremo norte del valle. El valle de Benito Juárez drena hacia el sur; en el se origina el arroyo Malpaso.

#### IV-10.5 Hidrología Superficial

En el área de estudio y en su vecindad se localizan -- diez estaciones climatológicas, de las cuales se obtuvo -- información relativa a la precipitación, temperatura y --- evaporación.

Precipitación. Con datos obtenidos en las estaciones climatológicas se elaboraron hietogramas que representan -- las condiciones de precipitación en la zona, pudiéndose ob-- servar que el período de lluvias es de junio a septiembre de cada año, ocurriendo lluvias esporádicas en los meses -- restantes; variando en general la precipitación anual de -- 405 a 597 mm.



**Temperatura.** Con los valores obtenidos en las estaciones climatológicas se elaboraron las gráficas correspondientes, en las cuales se interpretó que durante el año, - la temperatura asciende de febrero a junio y el descenso - se produce a partir de julio y continua hasta enero. Los - valores de la temperatura oscilan en promedio anual entre los 14.8 y 17.0°C.

**Evaporación.** Al igual que la precipitación y temperatura, los datos fueron obtenidos de las estaciones climatológicas y en base a estos datos se formaron las gráficas - que relacionan evaporación contra tiempo, pudiéndose interpretar en ellas que la evaporación de la zona asciende de enero a mayo y desciende en junio para terminar en diciembre, siendo la evaporación predominante en la mayor parte de la zona igual a 2,300 mm.

**Clasificación del clima.** El clima que prevalece en la mayor parte del área es de tipo seco estepario, templado, con verano cálido, con régimen de lluvias en verano y en menor importancia en invierno.

Cabe mencionar que los datos fueron obtenidos de las estaciones climatológicas más representativas de la región, considerando un período de retorno de 14 años. La interpretación estuvo a cargo de la S.A.R.H., por lo que únicamente se transcribió la información con el fin de dar una idea general del estado climatológico de la zona en estudio.

#### IV-10.6 Estratigrafía de la cuenca de Calera de Victor Rosales

La estratigrafía de los acuíferos de estos valles los constituyen sedimentos granulares depositados en un ambiente lacustre en fosas de origen tectónico originados por la formación de la Sierra Madre Occidental; la granulometría de los sedimentos varía de finos (arcillas y limos) a gruesos (arenas y gravillas); así mismo esta conformado también por intercalaciones de materiales piroclásticos y derrames de rocas volcánicas extrusivas de tipo andesítico y riolítico. La graduación de los materiales varía tanto lateral como verticalmente, lo que origina una marcada anisotropía del acuífero que se refleja en una variabilidad en el rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas.

En base a las exploraciones geofísicas realizadas en ambos valles se determinó que los sedimentos se depositaron en una cuenca tectónica del tipo complejo, es decir, - que el fondo rocoso presenta un relieve muy accidentado, - el que en algunas porciones se manifiesta próximo a la superficie del terreno y en otras a gran profundidad, por lo que los espesores de los sedimentos varían de 30 a más de 400 m.

#### IV-10.7 Litología y Registros Eléctricos realizados en la cuenca de estudio

De acuerdo con los cortes litológicos y registros --- eléctricos, se determinó que el acuífero de los valles de Calera y Benito Juárez, está formado por depósitos aluviales y lacustres de grano fino o relativamente grueso; arcillas, limos, arenas y gravas; y por conglomerados constituidos por gravas y arenas empacadas en un cementante arcilloso de naturaleza calcárea. Todos ellos se presentan en alternancias con intercalaciones de derrames de roca o tobas ígneas de naturaleza andesítica y riolítica en forma compacta o fracturada.

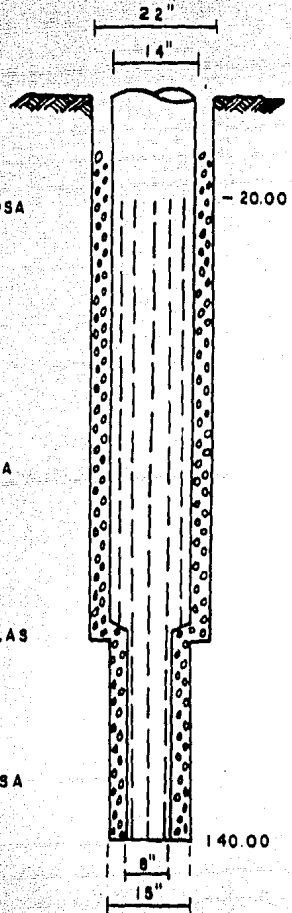
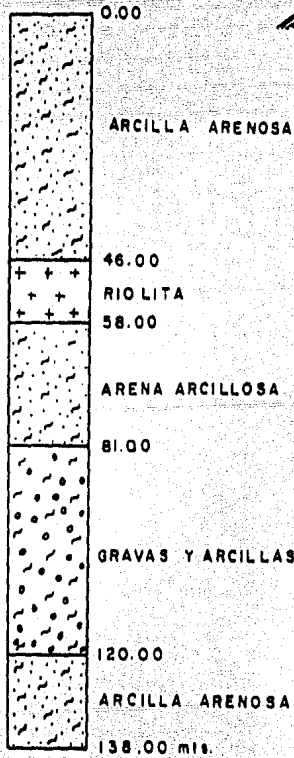
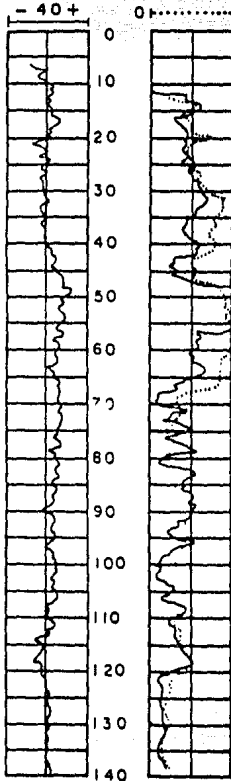
A continuación se muestran cinco pozos de aprovechamientos donde fueron realizadas las pruebas de bombeo, con sus respectivos cortes litológicos, registros eléctricos y cortes de terminación. Estas perforaciones inicialmente -- fueron de exploración, realizadas con el fin de obtener -- información acerca de la litología de la zona y una vez alcanzado éste objetivo se amplió su diámetro para usarlos -- como pozos de bombeo; se trato que las perforaciones fueran lo más representativas de la cuenca, aunque existe información de pruebas de bombeo de más pozos se dan éstos por -- ser los más completos en información y como ilustración al problema.

**POZO No. 316 - EJIDO OJUELOS**  
**UBICACION: EJIDO OJUELOS, MPO. DE FRESNILLO, EDO DE ZACAT.**

**REGISTRO ELECTRICO      CORTE LITOLOGICO      CORTE DE TERMINACION**

**POTENCIAL ESPONTANEO MILIVOLTS**      **RESISTIVIDAD OHMS-M**

- 40 +      0 — 50  
 0 ..... 50



POZO No. 690 — CIENEGUILLA

UBICACION: EJIDO CIENEGUILLA. MPO. DE ZACATECAS. EDO DE ZACAT.

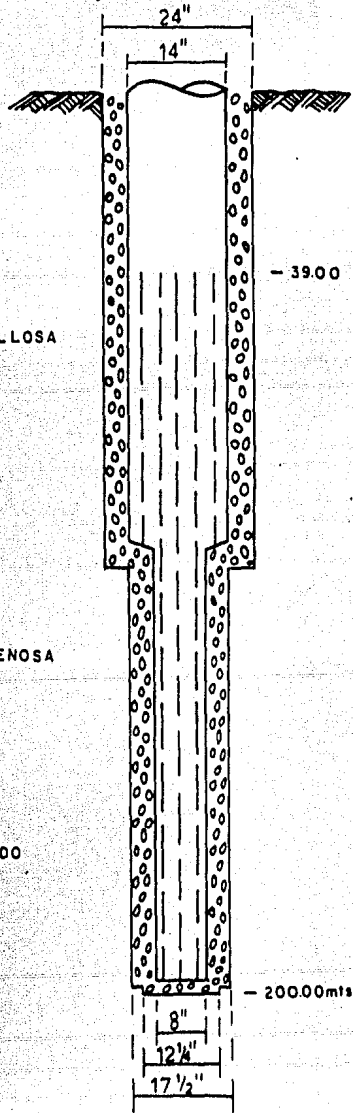
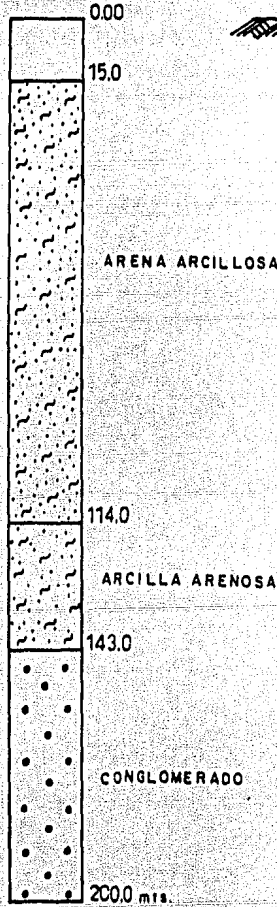
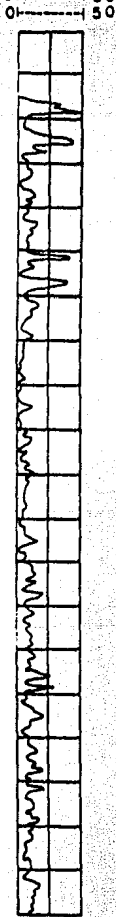
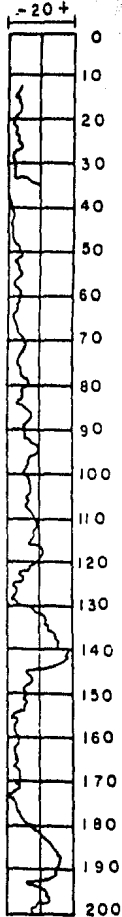
REGISTRO ELECTRICO

CORTE LITOLOGICO

CORTE DE TERMINACION

POTENCIAL  
EXPONANTANO  
MILIVOLTS

RESISTIVIDAD  
OHMS - M



POZO No. 705 — LA JOYA

UBICACION: LOS GRINGOS, MPO DE MORELOS, EDO. DE ZACATECAS.

REGISTRO ELECTRICO

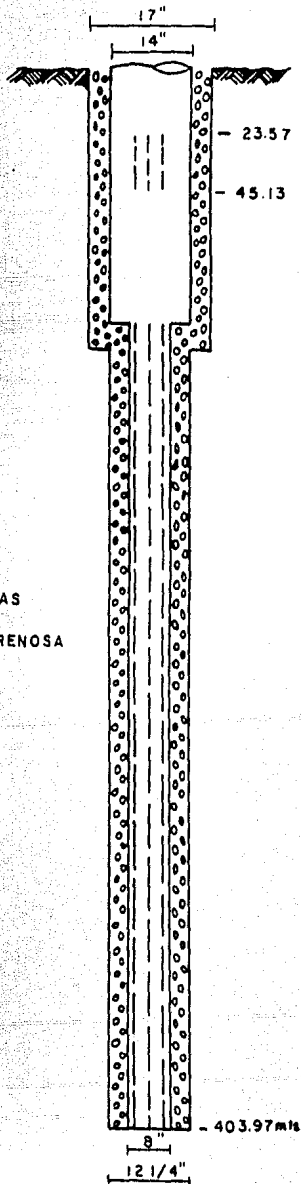
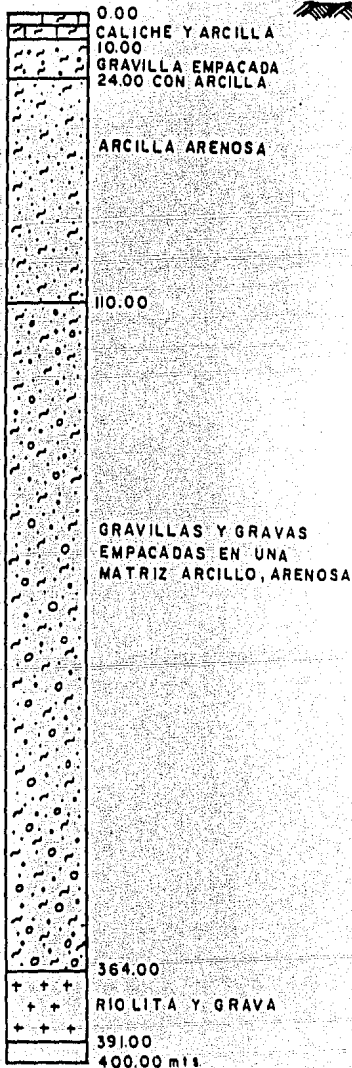
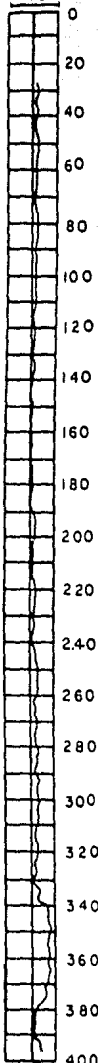
CORTE LITOLOGICO

CORTE DE TERMINACION

POTENCIAL  
EXPONTEANEO  
MILIVOLTS  
-40+

RESISTIVIDAD  
OHMS - M

0 100 100



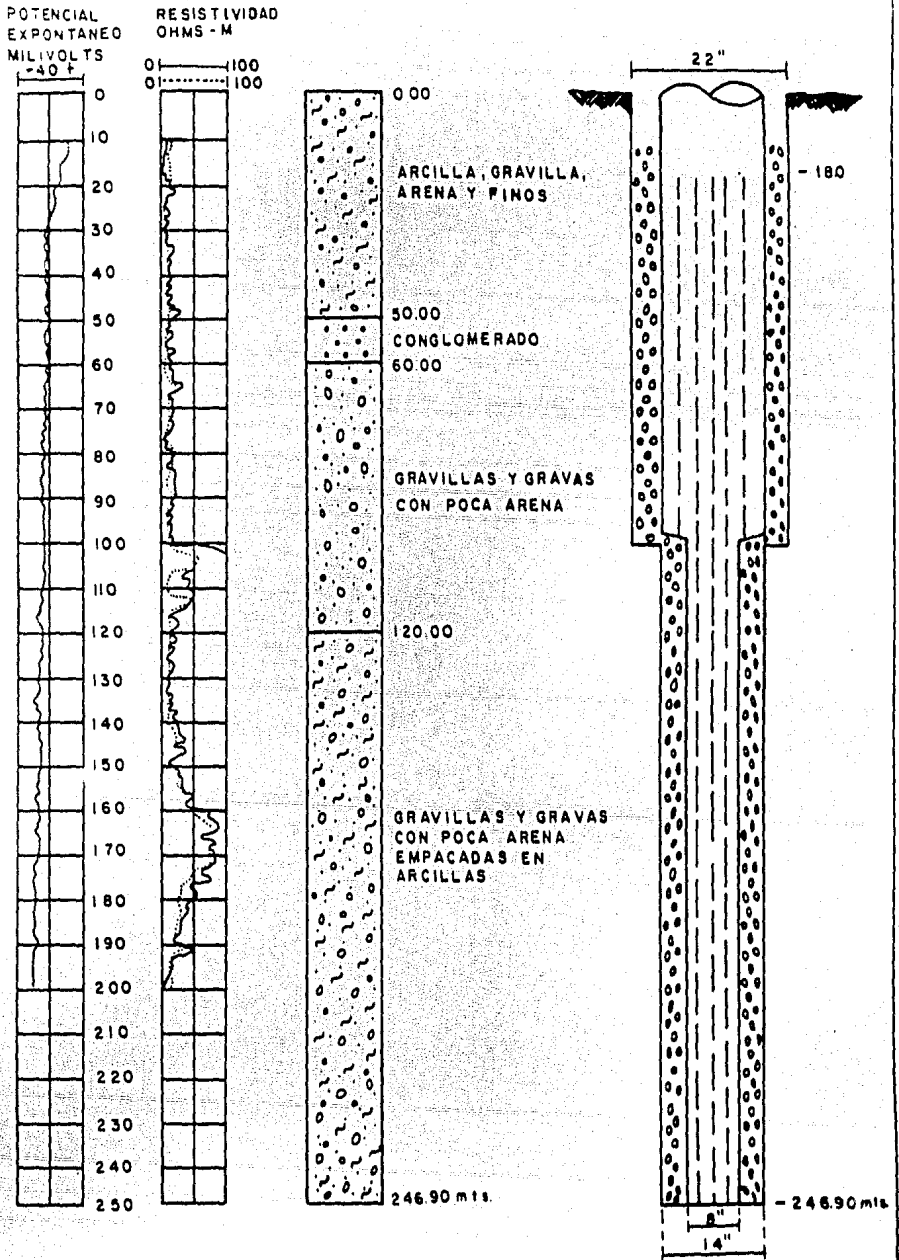
POZO No. 770 - PALMIRA

UBICACION: EJIDO PALMIRA MPO. DE FRESNILLO, EDO. DE ZACATECAS.

REGISTRO ELECTRICO

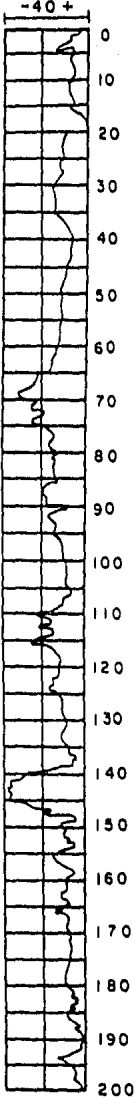
CORTE LITOLOGICO

CORTE DE TERMINACION

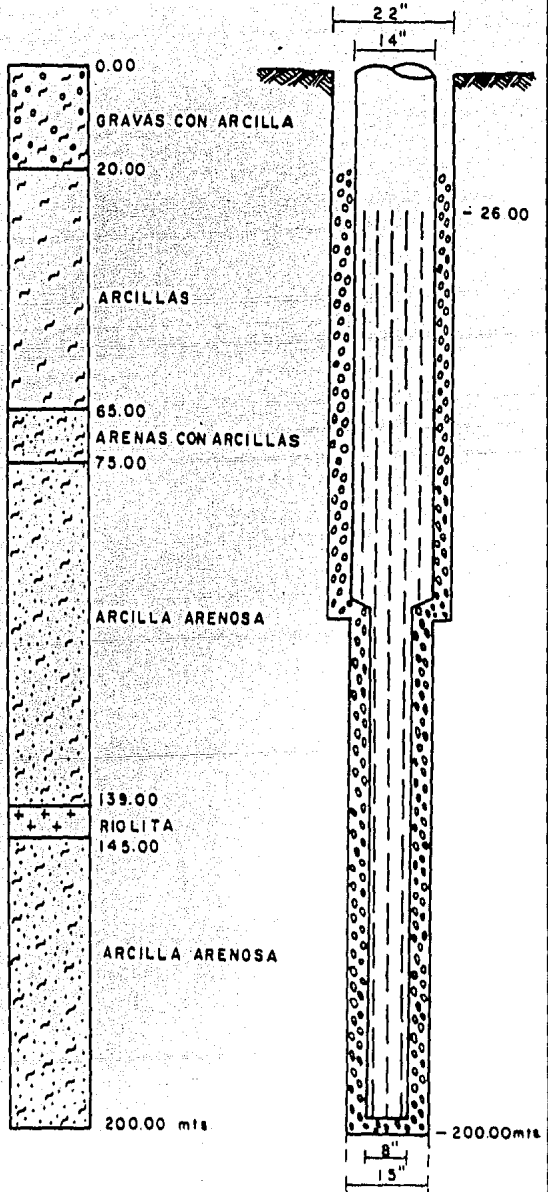
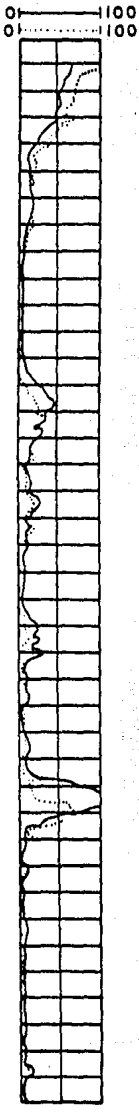


**POZO No. 931 - CALERA**  
**UBICACION: CALERA, MPO. DE CALERA, EDO. DE ZACATECAS.**  
**REGISTRO ELECTRICO      CORTE LITOLOGICO      CORTE DE TERMINACION**

POTENCIAL  
EXPTANEO  
MILIVOLTS



RESISTIVIDAD  
OHMS-M





#### IV-10.8 Recarga y descarga del acuífero

La recarga al acuífero ocurre principalmente entre el contacto de los materiales granulares con los afloramientos de las rocas ígneas que los limitan lateralmente, y -- por infiltraciones en los cauces de los arroyos que escurren torrencialmente hacia el centro del valle, además de la infiltración vertical en toda la superficie de los valles debido a los volúmenes precipitados y en parte posiblemente por los retornos de agua de riego al subsuelo.

En el valle de Calera, la descarga antes del inicio -- de la explotación por medio de pozos de agua subterránea -- ocurría a través de manantiales y por evaporación en la -- laguna de Santa Ana ubicada en la porción norte del valle. Actualmente la descarga sólo ocurre en forma artificial -- mediante el bombeo. La extracción en el valle de Calera es de 109 millones de metros cúbicos por año y su recarga de 50 millones de metros cúbicos por año.

En el valle de Benito Juárez la descarga del acuífero ocurre por extracción mediante bombeo y por evapotranspiración. En el valle de Benito Juárez tanto la extracción --- como la recarga es igual a 5 millones de metros cúbicos por año. Dichos valores fueron obtenidos por medio del balance de agua subterránea que se realiza en base a las características del acuífero (transmisibilidad y coeficiente de -- almacenamiento), calculadas a partir de las pruebas de --- bombeo y considerando la ecuación de flujo en un medio poroso basada en la Ley de Darcy.

#### IV-10.9 Pruebas de Bombeo

Para conocer las características hidrodinámicas: coeficiente de almacenamiento y transmisibilidad del acuífero, se efectuaron 35 pruebas de bombeo de corta duración. Las pruebas se llevaron a cabo en pozos convenientemente distribuidos, y cuya duración estuvo en función de la necesidad de uso de los pozos por parte de los propietarios que colaboraron para realizar éstas, así como del comportamiento de los niveles del agua.

Para lograr la efectividad de las pruebas de bombeo, se trató de que en los pozos utilizados fueran conocidas sus características constructivas e hidráulicas; de que dispusieran de condiciones de fácil medición de sus niveles de agua y que los equipos de bombeo se encontraran en buen estado.

Por los elevados costos que representa construir pozos de observación, las mediciones de la variación del nivel del agua durante la prueba de bombeo, se realizaron en el propio pozo de bombeo y lo cual fue considerado en la interpretación de dichas pruebas.

#### IV-10.10 Interpretación de las Pruebas de Bombeo

Las 35 pruebas de bombeo que se realizaron en la zona de Galera de Victor Rosales fueron interpretadas mediante la comparación de la variación de los niveles de agua observados con respecto al tiempo, basándose en las soluciones teóricas de las ecuaciones de Theis y Jacob que gobiernan el flujo en un medio poroso.

En la mayoría de las pruebas de bombeo que se interpretaron, los puntos determinados por las parejas de valores Tiempo-Profundidad al nivel del agua correspondiente a los primeros minutos, presentan una notable desviación de la recta o curva según sea el caso, a la cual se ajustan los puntos posteriores a este tiempo. Esta desviación se debe principalmente al efecto de almacenamiento en el pozo y a la pérdida de carga por entrada del flujo radial al pozo, tramo en el cual las hipótesis de Theis y Jacob no son aplicables. Sin embargo, el tramo recto o curvo definido en las pruebas de bombeo, permitió la aplicación de las teorías anteriores para determinar el coeficiente de transmisibilidad del acuífero.

Se utilizó el método aproximado para el cálculo del coeficiente de almacenamiento (véase apartado IV-9.5), --- debido a que las mediciones de los niveles se realizaron en el pozo de bombeo y por tanto carecemos del dato  $r$  (distancia del pozo de bombeo al pozo de observación en que se han medido los abatimientos), cuyo valor es fundamental para la aplicación de las fórmulas de Theis y Jacob.

De acuerdo a lo anterior, mencionaremos que en base - al método gráfico-numerico de Theis y Jacob, respectivamente desarrollados en éste capítulo, fueron interpretadas 24 pruebas de bombeo en etapa de abatimiento, obteniéndose -- para cada una el coeficiente de transmisibilidad y de almacenamiento, y en las 11 pruebas restantes se obtuvo únicamente un sólo coeficiente de los dos mencionados, debido a que no se lograron ajustar correctamente al sistema de --- flujo. A continuación se presentan las siguientes gráficas que representan la interpretación de las pruebas de bombeo de 10 pozos de aprovechamiento, basándose en el método gráfico-numerico ya descrito (ver apartado IV-9.1 y IV-9.2). Al igual que en las anteriores ocasiones se consideraron - los pozos que contaron con las suficientes características constructivas e hidráulicas, tomando estos pozos como re-- presentativos de la cuenca; cabe aclarar que las demás --- pruebas de bombeo se interpretaron de la misma manera.

En la tabla IV-2, se presenta un resumen de los resul-- tados de las 35 pruebas de bombeo realizadas en la zona de Calera de Victor Rosales.

Y finalmente, se incluye un plano de localización de las pruebas de bombeo donde se encuentran ubicados los --- pozos de aprovechamiento con sus respectivos coeficientes de transmisibilidad y almacenamiento entre otras caracte-- rísticas de cada pozo.

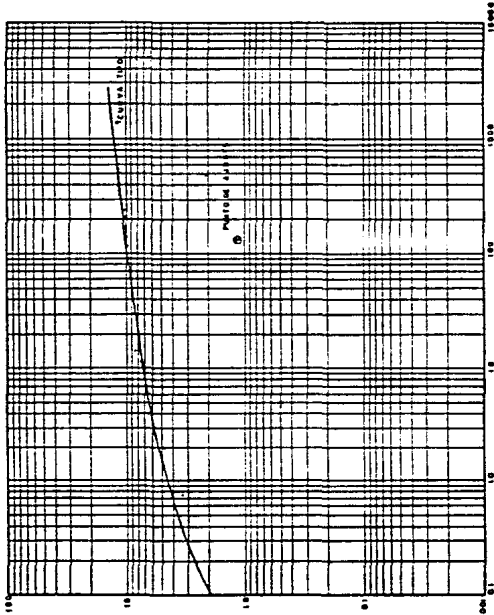
REGISTRO DE LA PRUEBA DE BOMBEO

**ESTADÍSTICAS DEL APOBECAMIENTO:**  
 POZO No. 47  
 CAUDAL 15 LPS  
 S DESC. 1524 CM  
 PROF. 92 MTS  
 PNE. 2893 MTS  
 CORDAZO (H) 2040 MTS

ESTADO ZACATECAS  
 MPO: FRENILLO  
 ZONA: LAS AURAS  
 DURACION: 10 HORAS  
 FECHA: 14 - FEB - 1980

SECUENCIA DE LECTURAS	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	ALZAMIENTO EN METROS	ALZAMIENTO EN METROS
0	0:00	18.53	0
1	0:05	18.50	7.93
2	0:10	18.47	15.86
3	0:15	18.44	23.79
4	0:20	18.41	31.72
5	0:25	18.38	39.65
6	0:30	18.35	47.58
7	0:35	18.32	55.51
8	0:40	18.29	63.44
9	0:45	18.26	71.37
10	0:50	18.23	79.30
11	0:55	18.20	87.23
12	1:00	18.17	95.16
13	1:05	18.14	103.09
14	1:10	18.11	111.02
15	1:15	18.08	118.95
16	1:20	18.05	126.88
17	1:25	18.02	134.81
18	1:30	17.99	142.74
19	1:35	17.96	150.67
20	1:40	17.93	158.60
21	1:45	17.90	166.53
22	1:50	17.87	174.46
23	1:55	17.84	182.39
24	2:00	17.81	190.32
25	2:05	17.78	198.25
26	2:10	17.75	206.18
27	2:15	17.72	214.11
28	2:20	17.69	222.04
29	2:25	17.66	230.00
30	2:30	17.63	237.93
31	2:35	17.60	245.86
32	2:40	17.57	253.79
33	2:45	17.54	261.72
34	2:50	17.51	269.65
35	2:55	17.48	277.58
36	3:00	17.45	285.51
37	3:05	17.42	293.44
38	3:10	17.39	301.37
39	3:15	17.36	309.30
40	3:20	17.33	317.23
41	3:25	17.30	325.16
42	3:30	17.27	333.09
43	3:35	17.24	341.02
44	3:40	17.21	348.95
45	3:45	17.18	356.88
46	3:50	17.15	364.81
47	3:55	17.12	372.74
48	4:00	17.09	380.67
49	4:05	17.06	388.60
50	4:10	17.03	396.53
51	4:15	17.00	404.46
52	4:20	16.97	412.39
53	4:25	16.94	420.32
54	4:30	16.91	428.25
55	4:35	16.88	436.18
56	4:40	16.85	444.11
57	4:45	16.82	452.04
58	4:50	16.79	460.00
59	4:55	16.76	467.93
60	5:00	16.73	475.86
61	5:05	16.70	483.79
62	5:10	16.67	491.72
63	5:15	16.64	499.65
64	5:20	16.61	507.58
65	5:25	16.58	515.51
66	5:30	16.55	523.44
67	5:35	16.52	531.37
68	5:40	16.49	539.30
69	5:45	16.46	547.23
70	5:50	16.43	555.16
71	5:55	16.40	563.09
72	6:00	16.37	571.02
73	6:05	16.34	578.95
74	6:10	16.31	586.88
75	6:15	16.28	594.81
76	6:20	16.25	602.74
77	6:25	16.22	610.67
78	6:30	16.19	618.60
79	6:35	16.16	626.53
80	6:40	16.13	634.46
81	6:45	16.10	642.39
82	6:50	16.07	650.32
83	6:55	16.04	658.25
84	7:00	16.01	666.18
85	7:05	15.98	674.11
86	7:10	15.95	682.04
87	7:15	15.92	690.00
88	7:20	15.89	697.93
89	7:25	15.86	705.86
90	7:30	15.83	713.79
91	7:35	15.80	721.72
92	7:40	15.77	729.65
93	7:45	15.74	737.58
94	7:50	15.71	745.51
95	7:55	15.68	753.44
96	8:00	15.65	761.37
97	8:05	15.62	769.30
98	8:10	15.59	777.23
99	8:15	15.56	785.16
100	8:20	15.53	793.09

METODO GRAFICO DE INTERPRETACION DE THEIS



COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD

$S = 0.018 \frac{h_0 - h}{H}$   
 $W(u) = 10$   
 $u = 10^{-4}$   
 $s = 0.0018$   
 $1 \times 10^{-4} = 0.018 \frac{h_0 - h}{H}$

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

$S = 2.30 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{u}$   
 $4 \text{ mds } 3 \cdot 80 \text{ m}$   
 $S = 13.38 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{1000}$   
 $S = 0.01338$

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES MANAGER  
 ESTUDIO GEOLOGICO DE LA ZONA DE CALERA, ZACATECAS



PRUEBA DE BOMBEO  
 ETAPA DE ABATIMIENTO

LEIDA RODRIGUEZ  
 JOSE MANUEL  
 JOSE MANUEL  
 JOSE MANUEL

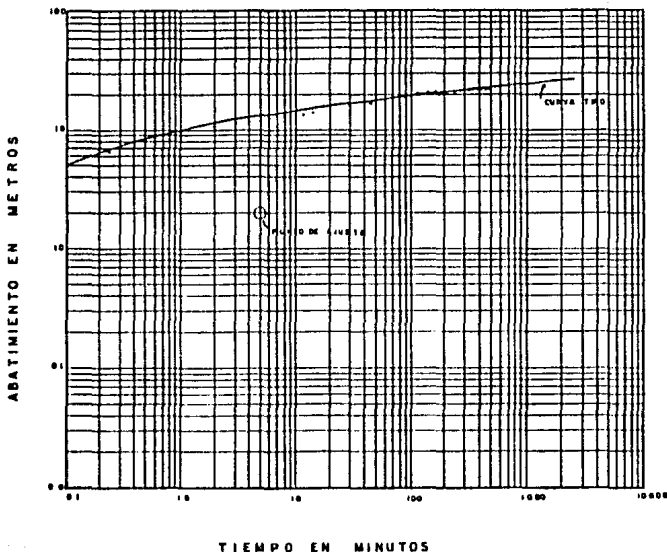
REGISTRO DE LA PRUEBA DE BOMBEO

METODO GRAFICO DE INTERPRETACION DE THEIS

ESTADO: ZACATECAS  
 MPO: FRESNILLO  
 ZONA: TORIBIO  
 DURACION: 8 HORAS  
 FECHA: 26 - FEB.-1980

CARACTERISTICAS DEL APROVECHAMIENTO	
POZO No	108
CAUDAL	39 LPS
DESC.	15 24 CM
PROP.	180 MTS
P.M.E.	38 80 MTS
CECADO (p)	0 A 80 MTS

SECUENCIA DE LECTURAS	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD NIVEL DEL ANIA EN METROS	ABATIMIENTO EN METROS
0	0 00	16.88	0
1 0 seg	0 08	17.35	0.47
3 0 "	0 30	18.10	1.22
4 0 "	0 38	18.74	1.86
1 min	1 00	19.71	2.83
2 "	2 00	20.70	3.82
3 "	3 00	20.84	3.96
4 "	4 00	20.88	3.99
5 "	5 00	20.97	4.08
6 "	6 00	20.97	4.07
15 "	12 00	21.78	4.88
15 "	18 00	21.82	4.92
30 "	30 00	22.80	5.92
45 "	45 00	23.08	6.20
1 hrs	60 00	23.37	6.49
1 hr 30 min	90 00	23.31	6.50
2 hrs	120 00	23.12	6.76
2 hrs 30 min	150 00	23.03	6.85
3 hrs	180 00	23.72	6.97
3 hrs 30 min	210 00	23.01	7.18
4 hrs	240 00	23.23	7.44
4 hrs 30 min	270 00	23.87	7.67
5 hrs	300 00	24.78	7.93
5 hrs 30 min	330 00	23.85	7.99
6 hrs	360 00	24.07	7.77
6 hrs 30 min	390 00	24.81	7.96
7 hrs	420 00	24.75	7.81
7 hrs 30 min	450 00	24.37	7.87
8 hrs	480 00	23.40	7.88
8 hrs 30 min	510 00		
9 hrs	540 00		



142

DATOS  
 $Q = 0.038 \text{ m}^3/\text{seg}$   
 $W(u) = 10$   
 $1/u_c = 10^3$   
 $s = 2.0 \text{ m}$   
 $T = 5 \text{ m/s}$

COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD  
 $T = \frac{Q}{4W(u)} W(u)$   
 $T = \frac{(0.038 \text{ m}^3/\text{seg}) (10)}{(4) (10^3) (20 \text{ m})}$   
 $T = 1.55 \times 10^{-5}$

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO  
 $S = 3.28 \times 10^{-5}$   
 $S = 30 \text{ m}$   
 $S = (10.28 \times 10^{-5}) (30 \text{ m})$   
 $S = 0.30 \times 10^{-3}$



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES AVANZADOS  
 ESTUDIO GEOLÓGICO DE LA ZONA DE CALERA, ZACATECAS

PRUEBA DE BOMBEO  
 ETAPA DE ABATIMIENTO

ESTUDIOS PROFESIONALES ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES AVANZADOS  
 LEONARDO HERNÁNDEZ LOPEZ ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES AVANZADOS

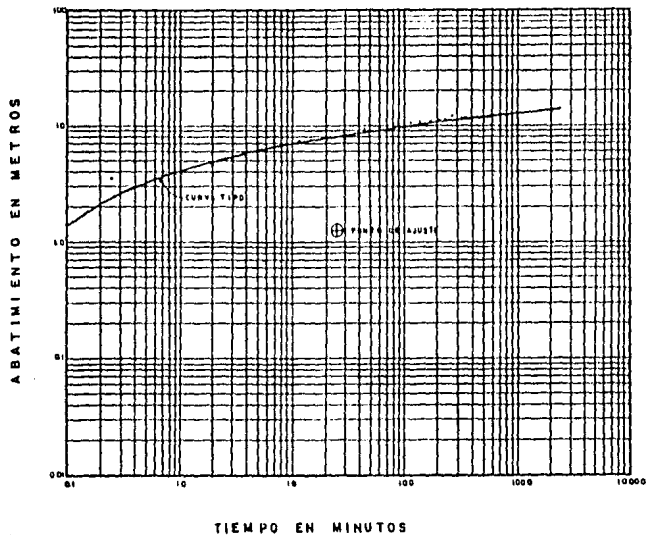
# REGISTRO DE LA PRUEBA DE BOMBEO

ESTADO: ZACATECAS  
MPO: FRESHILLO  
ZONA: FRACC. CALERA  
DURACION: 9 HORAS  
FECHA: 16-FEB-1980

**CARACTERÍSTICAS DEL ABOYECAMBIERO**  
POZO No. 318  
CAUDAL 22 LPS  
Ø DISC 18.24 CM  
PROF 136 MTS  
PNE 43.14 MTS  
CEDAZOIMED A 136 MTS

SECUENCIA DE LECTURAS	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL ABOYECAMBIERO EN METROS	ABATIMIENTO EN METROS
0	0:00	43.14	0
1	0:25	48.10	3.96
2	0:50	48.80	3.92
3	0:55	48.80	3.92
4	1:00	47.13	3.99
5	2:00	47.80	4.88
6	3:25	48.16	4.98
7	4:00	48.87	5.93
8	6:00	49.18	5.94
9	8:00	49.70	6.41
10	12:00	50.51	7.23
11	18:00	50.82	7.59
12	30:00	51.80	8.34
13	45:00	52.43	9.29
14	60:00	52.81	9.88
15	90:00	53.28	10.31
16	120:00	53.85	10.81
17	150:00	53.84	10.80
18	180:00	54.47	11.33
19	210:00	54.88	11.84
20	240:00	54.89	11.78
21	270:00	55.08	12.04
22	300:00	55.12	11.98
23	330:00	55.20	12.04
24	360:00	55.22	12.04
25	390:00	55.23	12.04
26	420:00	55.28	12.11
27	450:00	55.31	12.13
28	480:00	55.30	12.10
29	510:00	55.30	12.10
30	540:00	55.10	12.18
31	570:00		
32	600:00		

## METODO GRAFICO DE INTERPRETACION DE THEIS



### DATOS

$S = 0.022 \text{ m}^2/\text{seg}$   
 $w = 1.0$   
 $r_w = 0.18$   
 $s = 1.4 \text{ m}$   
 $t = 26 \text{ min}$

### COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD

$$T = \frac{Q}{4 \pi r_w W(u)}$$

$$T = \frac{0.022 \text{ m}^2/\text{seg}}{4 \pi (0.18) (1.0)}$$

$$T = 1.29 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$$

### COEFICIENTE EN ALMACENAMIENTO

$$u = 1.29 \times 10^{-3} \times \frac{r_w^2}{4 T t}$$

$$u = 1.29 \times 10^{-3} \times \frac{(0.18)^2}{4 \times 1.29 \times 10^{-3} \times 26 \times 60}$$

$$u = 0.39 \times 10^{-3}$$



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESTUDIO NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES Y MAGISTER  
ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE ZONA DE CALERA, ZACATECAS

PRUEBA DE BOMBEO  
ETAPA DE ABATIMIENTO

TESIS PROFESIONAL: LEONARDO HARRIGET LOPEZ  
ESCUELA: GEORRANÍMICA  
ESCUELA: LOGRANÍMICA

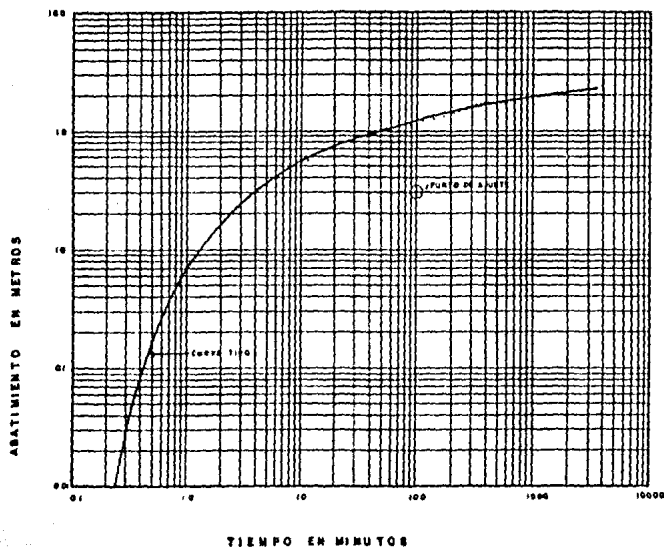
# REGISTRO DE LA PRUEBA DE BOMBEO

ESTADO: ZACATECAS  
 MPO: FRESHILLO  
 ZONA: EL TEPETATE  
 DURACION: 10 HORAS  
 FECHA: 28-ENERO-1980

CARACTERISTICAS DEL APROVECHAMIENTO	
POZO NF	508
CAUDAL	38 LPS
DESC	127 CM
PROF	80 MTS
PNE	43.23 MTS
CEDAZO (S)	0 A 80 MTS

SECUENCIA DE LECTURAS	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD NIVEL DEL AGUA EN METROS	ABATIMIENTO EN METROS
0	0:00	07.73	0
15 seg	0:15	07.73	0.00
30 "	0:30	07.80	0.07
45 "	0:45	08.00	0.27
1 min	1:00	08.08	0.35
2 "	2:00	08.22	0.50
3 "	3:00	08.32	0.58
4 "	4:00	08.38	0.63
5 "	5:00	08.42	0.65
6 "	6:00	08.45	0.67
7 "	7:00	08.48	0.69
8 "	8:00	08.50	0.70
9 "	9:00	08.51	0.71
10 "	10:00	08.52	0.71
15 "	15:00	08.54	0.73
30 "	30:00	08.55	0.74
45 "	45:00	08.56	0.74
1 hr	60:00	08.56	0.74
1hr 15 min	90:00	08.57	0.74
2 hrs	120:00	08.57	0.74
2hrs 30 min	150:00	08.57	0.74
3 hrs	180:00	08.58	0.73
3hrs 30 min	210:00	08.58	0.73
4 hrs	240:00	08.58	0.73
4hrs 30 min	270:00	08.58	0.73
5 hrs	300:00	08.58	0.73
5hrs 30 min	330:00	08.58	0.73
6 hrs	360:00	08.58	0.73
6hrs 30 min	390:00	08.58	0.73
7 hrs	420:00	08.58	0.73
7hrs 30 min	450:00	08.58	0.73
8 hrs	480:00	08.58	0.73
8hrs 30 min	510:00	08.58	0.73
9 hrs	540:00	08.58	0.73
9hrs 30 min	570:00	08.58	0.73
10 hrs	600:00	08.58	0.73

## METODO GRAFICO DE INTERPRETACION DE THEIS



### DATOS

$Q = 0.038 \text{ m}^3/\text{seg}$   
 $W(u) = 10$   
 $1/u = 10^2$   
 $s = 3.0m$   
 $t = 100 \text{ min}$

### COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD

$$T = \frac{Q}{4Wu}$$

$$T = \frac{(0.038 \text{ m}^3/\text{seg})}{(4)(10)(3.0 \text{ m})}$$

$$T = 1.0 \times 10^{-3}$$

### COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

$$S = 2.25 \times 10^{-3}$$

$$s = 3.00 \text{ m}$$

$$S = (2.25 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1})(3.0 \text{ m})$$

$$S = 0.66 \times 10^{-3}$$

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
	ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ESTUDIO GEODROLÓGICO DE LA ZONA DE CALERA, ZACATECAS	
PRUEBA DE BOMBEO ETAPA DE ABATIMIENTO	
FECHA DE ENTREGA: LEONARDO MARRAS	FECHA DE ENTREGA: L. MARRAS



# REGISTRO DE LA PRUEBA DE BOMBEO

ESTADO: ZACATECAS

MPO: FRESHILLO

ZONA: PALMIRA

DURACION: 7 HORAS

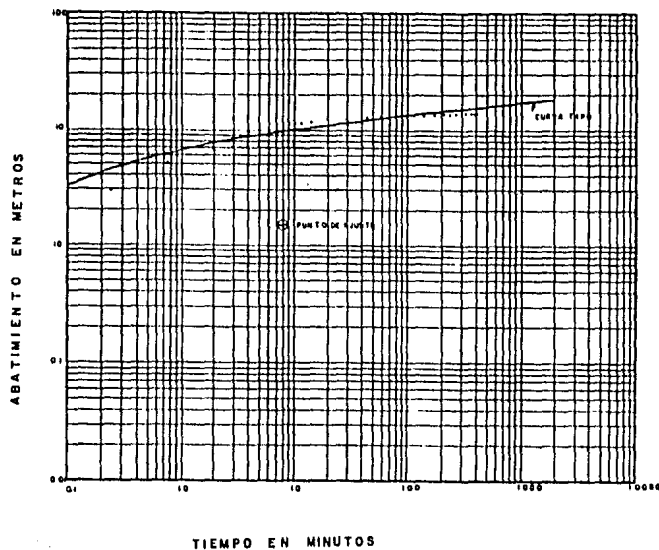
FECHA: 23 - FEB - 1980

## CARACTERISTICAS DEL APROVECHAMIENTO

POZO No	170
CAUDAL	42 LPS
SDISC	1524 CM
PROF	246 MTS
PNE	2336 MTS
CEDAZONI	18.246 MTS

SECUENCIA DE LECT. MAS	TIEMPO ACUMULADO EN METROS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS	ABATIMIENTO DE METROS
1	0 00	23 36	0
15 seg	0 15	28 24	4 88
30	0 30	27 06	6 30
45	0 45	26 52	6 84
1 min	1 00	26 20	7 16
2	2 00	30 00	6 64
3	3 00	31 84	6 08
4	4 00	32 96	5 52
5	5 00	34 10	5 26
6	6 00	34 71	5 13
7	7 00	35 18	4 82
8	8 00	35 71	4 76
9	9 00	36 23	4 77
10	10 00	36 83	4 79
11	11 00	37 08	4 73
12	12 00	37 28	4 63
13	13 00	37 70	4 34
14	14 00	37 98	4 38
15	15 00	38 10	4 53
16	16 00	38 10	4 74
17	17 00	38 21	4 63
18	18 00	38 31	4 58
19	19 00	38 37	4 51
20	20 00	38 40	4 54
21	21 00	38 43	4 67
22	22 00	38 48	4 58
23	23 00	38 45	4 58
24	24 00	38 45	4 58
25	25 00	38 45	4 58
26	26 00	38 45	4 58
27	27 00	38 45	4 58
28	28 00	38 45	4 58
29	29 00	38 45	4 58
30	30 00	38 45	4 58
31	31 00	38 45	4 58
32	32 00	38 45	4 58
33	33 00	38 45	4 58
34	34 00	38 45	4 58
35	35 00	38 45	4 58
36	36 00	38 45	4 58
37	37 00	38 45	4 58
38	38 00	38 45	4 58
39	39 00	38 45	4 58
40	40 00	38 45	4 58
41	41 00	38 45	4 58
42	42 00	38 45	4 58
43	43 00	38 45	4 58
44	44 00	38 45	4 58
45	45 00	38 45	4 58
46	46 00	38 45	4 58
47	47 00	38 45	4 58
48	48 00	38 45	4 58
49	49 00	38 45	4 58
50	50 00	38 45	4 58
51	51 00	38 45	4 58
52	52 00	38 45	4 58
53	53 00	38 45	4 58
54	54 00	38 45	4 58
55	55 00	38 45	4 58
56	56 00	38 45	4 58
57	57 00	38 45	4 58
58	58 00	38 45	4 58
59	59 00	38 45	4 58
60	60 00	38 45	4 58
61	61 00	38 45	4 58
62	62 00	38 45	4 58
63	63 00	38 45	4 58
64	64 00	38 45	4 58
65	65 00	38 45	4 58
66	66 00	38 45	4 58
67	67 00	38 45	4 58
68	68 00	38 45	4 58
69	69 00	38 45	4 58
70	70 00	38 45	4 58
71	71 00	38 45	4 58
72	72 00	38 45	4 58
73	73 00	38 45	4 58
74	74 00	38 45	4 58
75	75 00	38 45	4 58
76	76 00	38 45	4 58
77	77 00	38 45	4 58
78	78 00	38 45	4 58
79	79 00	38 45	4 58
80	80 00	38 45	4 58

## METODO GRAFICO DE INTERPRETACION DE THEIS



DA: 03

COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

$$Q = 0.142 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$W(u) = 1.0$$

$$r_w = 10^3$$

$$S = 0.03$$

$$r = 8.0 \text{ m}$$

$$T = \frac{Q}{4 \pi s} W(u)$$

$$T = \frac{(0.042 \text{ m}^3/\text{seg})}{(4 \pi) (1) (100 \text{ m})} (1.0)$$

$$T = 2.03 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$$

$$s = 3.28 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

$$\text{desde } b = 220 \text{ m}$$

$$s = (3.28 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}) (220 \text{ m})$$

$$s = 0.72 \times 10^{-3}$$



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ARAGON"

ESTUDIO GEOLÓGICO DE LA ZONA DE CALERA, ZACATECAS

PRUEBA DE BOMBEO  
ETAPA DE ABATIMIENTO

TESIS PROFESIONAL  
LEONARDO MARQUEZ LOPEZ

ESCUELA  
LOGARÍTMICA

ESCUELA  
LOGARÍTMICA

REGISTRO DE LA PRUEBA DE BOMBEO

METODO GRAFICO DE INTERPOLACION DE JACOB

ESTADO : ZACATECAS

MPO: FRESNILLO

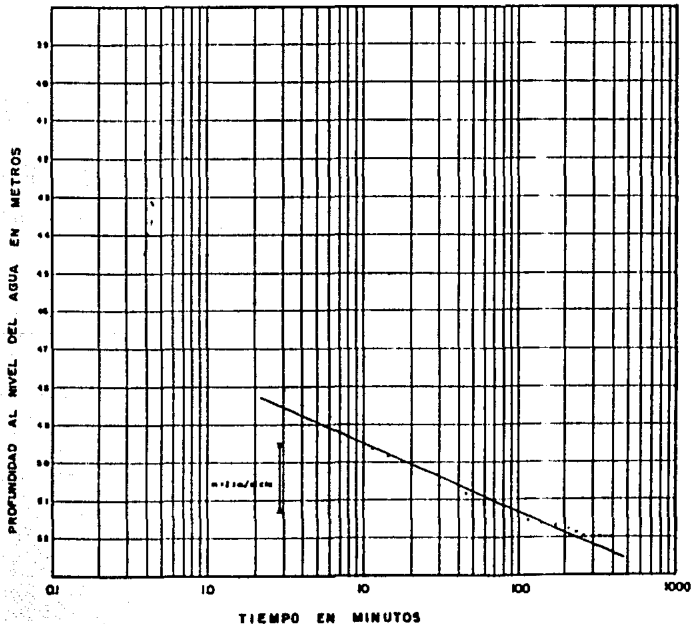
ZONA: EJIDO CALERA

DURACION: 7 HORAS

FECHA: 8-ENERO-1980

CARACTERISTICA DEL AMOVEDAMIENTO		
POZO No.	30	
CAUDAL	48	LPS
DESC	152	CM
PROP.	114	MTR
P.N.E.	2400	MTR
CEGAZO (SI)	ED A 114	MTR

SECUENCIA DE LECTURAS	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS
0	0 00	34 60
10 min	0 10	37 08
20	0 20	39 58
30	0 30	41 50
1 hr	1 00	44 63
2	2 00	46 79
3	3 00	48 07
4	4 00	49 59
5	5 00	51 19
6	6 00	52 32
7	7 00	53 52
8	8 00	54 82
9	9 00	55 82
10	10 00	56 82
11	11 00	57 82
12	12 00	58 82
13	13 00	59 82
14	14 00	60 82
15	15 00	61 10
1 hr 30 min	90 00	61 41
2 hr	180 00	61 94
3 hr 30 min	270 00	62 51
5 hr	360 00	63 52
6 hr 30 min	450 00	64 73
8 hr	480 00	64 98
9 hr 30 min	570 00	65 55
10 hr	600 00	66 58
11 hr 30 min	690 00	67 98
13 hr	780 00	69 00
14 hr 30 min	870 00	70 00
16 hr	960 00	71 00
17 hr 30 min	1050 00	72 00
19 hr	1140 00	73 00
20 hr 30 min	1230 00	74 00
22 hr	1320 00	75 00
23 hr 30 min	1410 00	76 00



146

DATOS

$Q = 0.048 \text{ m}^3/\text{seg}$   
 $s = 23 \text{ m}$   
 $s_{10} = 1 \text{ ciclo}$   
 $s = \frac{23 \cdot 3.14}{2 \cdot 3.14}$   
 $s = 2.3 \text{ m/ciclo}$

COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD

$T = 0.152 \text{ d}$   
 $T = \frac{(0.152 \cdot 0.048 \text{ m}^3/\text{seg})}{2.1 \text{ m}}$   
 $T = 4.27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

$\mu = 3.20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$   
 $s_{10} = 24 \text{ m}$   
 $\mu = [3.20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}] (24 \text{ m})$   
 $\mu = 0.031 \cdot 10^{-3}$



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES TERCER  
 ESTUDIO GEOLÓGICO DE LA ZONA DE CALERA, ZACATECAS

PRUEBA DE BOMBEO  
 ETAPA DE ABATIMIENTO

INGENIERO PROFESIONAL  
 LEONARDO MARQUEZ LOPEZ

INGENIERO  
 MARILYN A. LABRANTE

REGISTRO DE LA PRUEBA DE BOMBEO

METODO GRAFICO DE INTERPOLACION DE JACOB

ESTADO ZACATECAS

MUNICIPIO: PUEBILLO

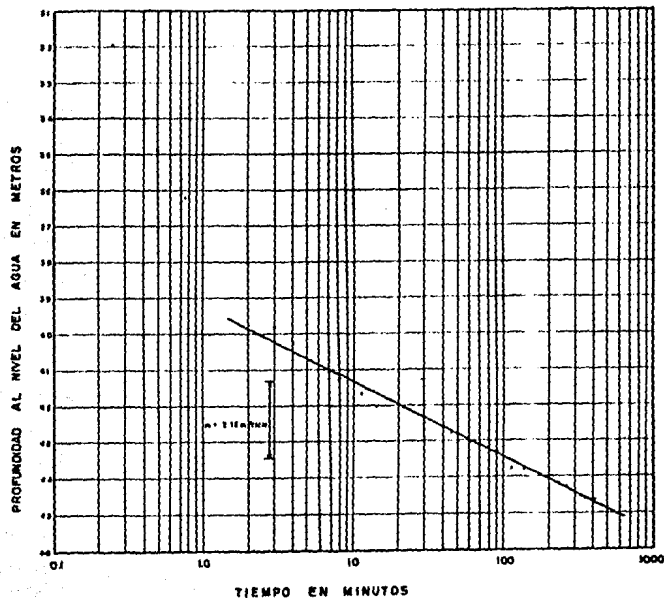
ZONA: EJIDO CALERA

DURACION: 7 HORAS

FECHA: 22-NOVIEMBRE-1978

CARACTERISTICAS DEL APROVECHAMIENTO			
POZD No.	45		
CANAL	15	LPS	
Ø DKSG	16.24	CM	
PROP	150.00	MTR	
PNE	18.87	MTR	
CEDAFOISI FO	A 150	MTR	

MEGICION DE LECTURAS	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS
0	0:00	29.82
15 seg	0:15	29.88
30	0:30	29.93
45	0:45	29.98
1 min	1:00	30.00
2	1:00	30.02
3	1:00	30.02
4	1:00	30.02
5	1:00	30.02
6	1:00	30.02
7	1:00	30.02
8	1:00	30.02
9	1:00	30.02
10	1:00	30.02
11	1:00	30.02
12	1:00	30.02
13	1:00	30.02
14	1:00	30.02
15	1:00	30.02
16	1:00	30.02
17	1:00	30.02
18	1:00	30.02
19	1:00	30.02
20	1:00	30.02
21	1:00	30.02
22	1:00	30.02
23	1:00	30.02
24	1:00	30.02
25	1:00	30.02
26	1:00	30.02
27	1:00	30.02
28	1:00	30.02
29	1:00	30.02
30	1:00	30.02
31	1:00	30.02
32	1:00	30.02
33	1:00	30.02
34	1:00	30.02
35	1:00	30.02
36	1:00	30.02
37	1:00	30.02
38	1:00	30.02
39	1:00	30.02
40	1:00	30.02
41	1:00	30.02
42	1:00	30.02
43	1:00	30.02
44	1:00	30.02
45	1:00	30.02
46	1:00	30.02
47	1:00	30.02
48	1:00	30.02
49	1:00	30.02
50	1:00	30.02
51	1:00	30.02
52	1:00	30.02
53	1:00	30.02
54	1:00	30.02
55	1:00	30.02
56	1:00	30.02
57	1:00	30.02
58	1:00	30.02
59	1:00	30.02
60	1:00	30.02
61	1:00	30.02
62	1:00	30.02
63	1:00	30.02
64	1:00	30.02
65	1:00	30.02
66	1:00	30.02
67	1:00	30.02
68	1:00	30.02
69	1:00	30.02
70	1:00	30.02



DATOS  
 $Q = 0.019 \text{ m}^3/\text{seg}$   
 $A_0 = 2.22 \text{ m}$   
 $S_{10} = 1.1215$   
 $m = 1.1215$   
 $S_{10} = 1.1215$   
 $m = 2.22 \text{ m}/1.1215$

COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD  
 $T = 0.185 \text{ g}$   
 $T = \frac{[0.185] (0.019 \text{ m}^3/\text{seg})}{2.22 \text{ m}}$   
 $T = 1.54 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO  
 $S = 5.22 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$   
 $2.22 \times 10 \text{ m}$   
 $S = (5.22 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}) (10 \text{ m})$   
 $S = 0.522 \times 10^{-1}$



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES TERCER

ESTUDIO HIDROLOGICO DE LA ZONA DE CALERA, ZACATECAS

PRUEBA DE BOMBEO  
 ETAPA DE ABATIMIENTO

TESIS PROFESIONAL  
 LEONARDO MARQUEZ LOPEZ

ESC. UNAM  
 AMI-MEXICA

ESC. UNAM  
 ASISTENTE

# REGISTRO DE LA PRUEBA DE BOMBEO

# METODO GRAFICO DE INTERPOLACION DE JACOB

ESTADO: ZACATECAS

MPO: PRESBILLO

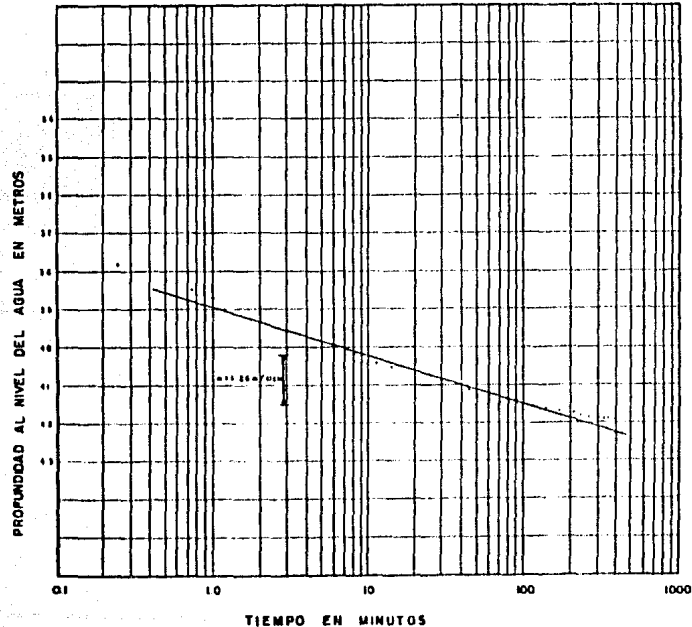
ZONA: EL PARDILLO

DURACION: 7 HORAS

FECHA: 0-FEBRERO-1960

CARACTERISTICA DEL APROVECHAMIENTO	
POZO No	552
CAUDAL	40 LPS
DESC	18.24 CM
PROF	100.00 MTS
PNE	58.28 MTS
CEDA(103)	0 A 100 MTS

SECUCENCIA DE LECTURAS	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS
0	0.00	99.88
10 min	0.10	97.81
20 "	0.20	95.72
30 "	0.75	93.67
1 hr	1.00	91.75
2 "	2.00	89.88
3 "	3.00	88.06
4 "	4.00	86.28
5 "	5.00	84.54
6 "	6.00	82.84
8 "	8.00	80.18
12 "	12.00	76.61
18 "	18.00	73.06
30 "	30.00	66.91
45 "	45.00	61.11
1 hr	60.00	55.81
1hr 30 min	90.00	51.48
2 hr	120.00	47.88
2hr 30 min	150.00	44.88
3 hr	180.00	42.39
3hr 30 min	210.00	40.39
4 hr	240.00	38.79
4hr 30 min	270.00	37.59
5 hr	300.00	36.88
5hr 30 min	330.00	36.27
6 hr	360.00	35.88
6hr 30 min	390.00	35.58
7 hr	420.00	35.38
7hr 30 min	450.00	35.28
8 hr	480.00	35.28
8hr 30 min	510.00	35.28
9 hr	540.00	35.28
9hr 30 min	570.00	35.28
10 hrs	600.00	35.28



**DATOS**

$Q = 0.040 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $\Delta s = 1.24 \text{ m}$   
 $A_{100} = 1 \text{ ciclo}$   
 $\mu = 1.24 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$   
 $A_{100} = 1 \text{ ciclo}$   
 $\mu = 1.24 \text{ m}^2/\text{ciclo}$

**COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD**

$$T = \frac{0.183 Q}{\mu}$$

$$T = \frac{0.183 (0.040 \text{ m}^3/\text{s})}{1.24 \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$T = 5.91 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$$

**COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO**

$$S = \frac{2.25 (1 - T) \mu}{Q}$$

$$S = \frac{2.25 (1 - 0.00591) (1.24 \text{ m}^2/\text{s})}{0.040 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$S = 71.28 \times 10^{-3}$$



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "AMBRO"  
 ESTILO GEOMORFOLOGICO DE LA ZONA DE  
 CALINA, ZACATECAS

PRUEBA DE BOMBEO  
 ETAPA DE ABATIMIENTO

TESA PROFESIONAL  
 LEONARDO BARRALES LOPEZ

ESCUELA  
 DE CALINA, ZACATECAS

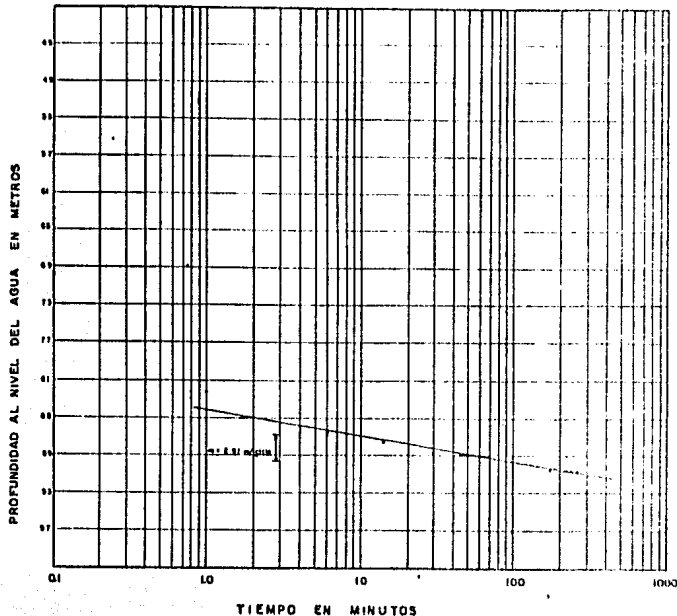
REGISTRO DE LA PRUEBA DE BOMBEO

METODO GRAFICO DE INTERPOLACION DE JACOB

ESTADO : ZACATECAS  
 MPO: MORELOS  
 ZONA LA JOYA  
 DURACION: 6 HORAS  
 FECHA: 4-FEBRERO-1980

CARACTERISTICA DEL APROVECHAMIENTO	
POZO No	705
CAUDAL	24 LPS
Ø DESC	18.24 CM
PROF	100 MTS
P R E	48.32 MTS
CECAJOS	23 A 400 MTS

SECUENCIA DE LECTURAS	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS
0	0 00	48.32
15	0 15	48.26
30	0 30	48.20
45	0 45	48.14
1 hr	1 00	48.08
1 15	1 15	48.02
1 30	1 30	47.96
1 45	1 45	47.90
2 00	2 00	47.84
2 15	2 15	47.78
2 30	2 30	47.72
2 45	2 45	47.66
3 00	3 00	47.60
3 15	3 15	47.54
3 30	3 30	47.48
3 45	3 45	47.42
4 00	4 00	47.36
4 15	4 15	47.30
4 30	4 30	47.24
4 45	4 45	47.18
5 00	5 00	47.12
5 15	5 15	47.06
5 30	5 30	47.00
5 45	5 45	46.94
6 00	6 00	46.88
6 15	6 15	46.82
6 30	6 30	46.76
6 45	6 45	46.70
7 00	7 00	46.64
7 15	7 15	46.58
7 30	7 30	46.52
7 45	7 45	46.46
8 00	8 00	46.40
8 15	8 15	46.34
8 30	8 30	46.28
8 45	8 45	46.22
9 00	9 00	46.16
9 15	9 15	46.10
9 30	9 30	46.04
9 45	9 45	45.98
10 00	10 00	45.92



149

DATOS  
 $Q = 0.024 \text{ m}^3/\text{seg}$   
 $s_0 = 2.81 \text{ m}$   
 $A_{100\%} = 1.12110$   
 $s = 1.81 \text{ m}$   
 $A_{100\%} = 1.12110$   
 $s = 2.81 \text{ m}$

COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD  
 $T = 0.182.8$   
 $T = \frac{(0.024 \text{ m}^3/\text{seg})}{2.81 \text{ m} \times C}$   
 $T = 1.66 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO  
 $\mu = 2.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3$   
 $Q = 0.024 \text{ m}^3/\text{seg}$   
 $s = (2.22 \times 10^{-6} \text{ m}^3) / (0.024 \text{ m}^3/\text{seg})$   
 $s = 0.12 \times 10^{-6}$

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
	FACULTAD NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES EN TARASCÓN
	ESTUDIO GEODINAMICO DE LA ZONA DE CALERA, ZACATECAS
PRUEBA DE BOMBEO ETAPA DE ABATIMIENTO	
TESIS PROFESIONAL LEONARDO MARRQUEZ LOPEZ	ESC. No. 18C No. 1 IDENTIFICACION 18C No. 1

# REGISTRO DE LA PRUEBA DE BOMBEO

# METODO GRAFICO DE INTERPOLACION DE JACOB

ESTADO: ZACATECAS

MPIO: CALERA

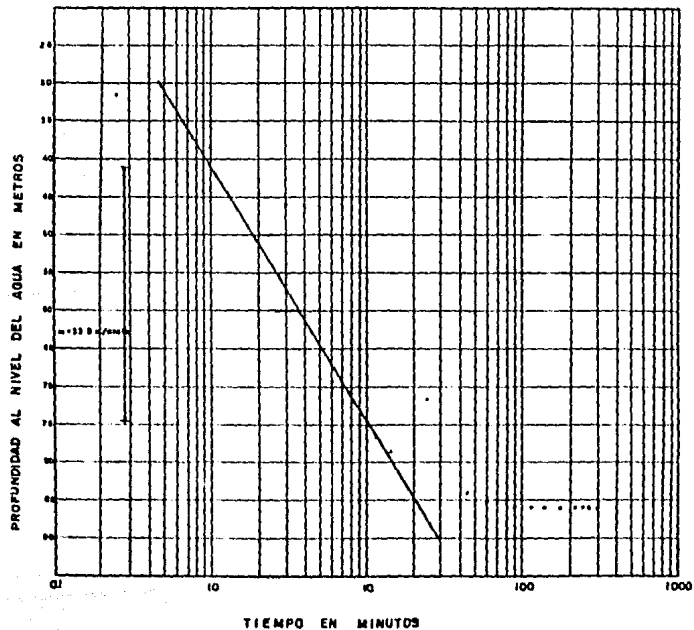
ZONA: TERMOELECTRICA

DURACION: 8 HORAS

FECHA: 10-OCTUBRE-1978

CARACTERISTICAS DEL APROVECHAMIENTO	
POZO No	031
CARGAL	15 LPS
Ø DESC.	10.24 CM
PROP.	180 MTS
PRE	28.80 MTS
CEDAZO(S)	0 A 160 MTS

SECUENCIA DE LECTURAS	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS
0	0:00	70.88
1	0:05	72.50
2	0:10	74.89
3	0:15	77.28
4	1:00	78.90
5	2:00	74.82
6	3:00	70.80
7	4:00	68.85
8	5:00	67.07
9	6:00	70.88
10	7:00	70.82
11	8:00	70.84
12	9:00	69.78
13	10:00	67.28
14	11:00	67.28
15	12:00	68.10
16	13:00	69.75
17	14:00	69.80
18	15:00	69.82
19	16:00	69.82
20	17:00	69.82
21	18:00	69.82
22	19:00	69.82
23	20:00	69.82
24	21:00	69.82
25	22:00	69.82
26	23:00	69.82
27	24:00	69.82
28	25:00	69.82
29	26:00	69.82
30	27:00	69.82
31	28:00	69.82
32	29:00	69.82
33	30:00	69.82
34	31:00	69.82
35	32:00	69.82
36	33:00	69.82
37	34:00	69.82
38	35:00	69.82
39	36:00	69.82
40	37:00	69.82
41	38:00	69.82
42	39:00	69.82
43	40:00	69.82
44	41:00	69.82
45	42:00	69.82
46	43:00	69.82
47	44:00	69.82
48	45:00	69.82
49	46:00	69.82
50	47:00	69.82
51	48:00	69.82
52	49:00	69.82
53	50:00	69.82
54	51:00	69.82
55	52:00	69.82
56	53:00	69.82
57	54:00	69.82
58	55:00	69.82
59	56:00	69.82
60	57:00	69.82
61	58:00	69.82
62	59:00	69.82
63	60:00	69.82
64	61:00	69.82
65	62:00	69.82
66	63:00	69.82
67	64:00	69.82
68	65:00	69.82
69	66:00	69.82
70	67:00	69.82
71	68:00	69.82
72	69:00	69.82
73	70:00	69.82
74	71:00	69.82
75	72:00	69.82
76	73:00	69.82
77	74:00	69.82
78	75:00	69.82
79	76:00	69.82
80	77:00	69.82
81	78:00	69.82
82	79:00	69.82
83	80:00	69.82
84	81:00	69.82
85	82:00	69.82
86	83:00	69.82
87	84:00	69.82
88	85:00	69.82
89	86:00	69.82
90	87:00	69.82
91	88:00	69.82
92	89:00	69.82
93	90:00	69.82
94	91:00	69.82
95	92:00	69.82
96	93:00	69.82
97	94:00	69.82
98	95:00	69.82
99	96:00	69.82
100	97:00	69.82
101	98:00	69.82
102	99:00	69.82
103	100:00	69.82
104	101:00	69.82
105	102:00	69.82
106	103:00	69.82
107	104:00	69.82
108	105:00	69.82
109	106:00	69.82
110	107:00	69.82
111	108:00	69.82
112	109:00	69.82
113	110:00	69.82
114	111:00	69.82
115	112:00	69.82
116	113:00	69.82
117	114:00	69.82
118	115:00	69.82
119	116:00	69.82
120	117:00	69.82
121	118:00	69.82
122	119:00	69.82
123	120:00	69.82
124	121:00	69.82
125	122:00	69.82
126	123:00	69.82
127	124:00	69.82
128	125:00	69.82
129	126:00	69.82
130	127:00	69.82
131	128:00	69.82
132	129:00	69.82
133	130:00	69.82
134	131:00	69.82
135	132:00	69.82
136	133:00	69.82
137	134:00	69.82
138	135:00	69.82
139	136:00	69.82
140	137:00	69.82
141	138:00	69.82
142	139:00	69.82
143	140:00	69.82
144	141:00	69.82
145	142:00	69.82
146	143:00	69.82
147	144:00	69.82
148	145:00	69.82
149	146:00	69.82
150	147:00	69.82
151	148:00	69.82
152	149:00	69.82
153	150:00	69.82
154	151:00	69.82
155	152:00	69.82
156	153:00	69.82
157	154:00	69.82
158	155:00	69.82
159	156:00	69.82
160	157:00	69.82
161	158:00	69.82
162	159:00	69.82
163	160:00	69.82
164	161:00	69.82
165	162:00	69.82
166	163:00	69.82
167	164:00	69.82
168	165:00	69.82
169	166:00	69.82
170	167:00	69.82
171	168:00	69.82
172	169:00	69.82
173	170:00	69.82
174	171:00	69.82
175	172:00	69.82
176	173:00	69.82
177	174:00	69.82
178	175:00	69.82
179	176:00	69.82
180	177:00	69.82
181	178:00	69.82
182	179:00	69.82
183	180:00	69.82
184	181:00	69.82
185	182:00	69.82
186	183:00	69.82
187	184:00	69.82
188	185:00	69.82
189	186:00	69.82
190	187:00	69.82
191	188:00	69.82
192	189:00	69.82
193	190:00	69.82
194	191:00	69.82
195	192:00	69.82
196	193:00	69.82
197	194:00	69.82
198	195:00	69.82
199	196:00	69.82
200	197:00	69.82



### DATOS

$Q = 0.019 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $S_0 = 33.5 \text{ m}$   
 $S_{100} = 1.1 \text{ ciclo}$   
 $m = 11 = 32.3 \text{ m}$   
 $S_{100} = 1 \text{ ciclo}$   
 $n = 33.5 \text{ m/ciclo}$

### COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD

$T = 0.122.2$   
 $T = (0.122) (0.019 \text{ m}^3/\text{s})$   
 $33.5 \text{ m}$   
 $T = 0.82 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

### COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

$S = 2.88 \times 10^{-4} \text{ m}^2$   
 $n = 180 \text{ m}$   
 $S = (3.28 \times 10^{-4} \text{ m}^2) (180 \text{ m})$   
 $S = 0.69 \times 10^{-4}$



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "AMARON"  
 ESTUDIO DE HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE CALERA, ZACATECAS

PRUEBA DE BOMBEO  
 ETAPA DE ABATIMIENTO

TESTE PROFESORAL  
 LITIMORO, RAMÍREZ LOPEZ

ESCUELA DE ABATIMIENTO  
 ESCUELA DE ABATIMIENTO

TABLA IV-2

RESUMEN DE PRUEBAS DE BOMBEO DE CORTA DURACION

ESTADO: ZACATECAS

ZONA: CALERA

Pozo No.	Prof. (m)	Tiempo de duración de la prueba (hrs)	Diámetro de descarga (cm)	Nivel Estático (m)	Nivel Dinámico (m)	Caudal (l.p.s.)	Transmisibilidad ( $T \times 10^{-3}$ )	Coef. de Almacenamiento ( $S \times 10^{-3}$ )	Interpretación
10	100.00	6.00	15.24	42.70	58.00	15.00	N.I.	0.33	
17	101.00	6.00	15.24	38.64	77.97	21.00	1.24	0.33	JACOB
24	121.00	10.00	15.24	41.15	53.49	29.00	5.20	0.30	JACOB
30	114.00	7.00	15.24	34.60	52.00	49.00	4.27	0.31	JACOB •
42	92.00	11.00	15.24	28.43	40.70	15.00	0.95	0.16	THEIS •
46	130.00	7.00	15.24	29.62	44.63	19.00	1.64	0.36	JACOB •
47	50.00	6.00	12.70	22.46	40.60	6.50	1.03	0.16	THEIS
78	63.00	6.00	15.24	20.47	36.71	20.00	0.70	0.15	JACOB
98	81.00	6.00	15.24	26.64	45.33	32.00	N.I.	0.27	
109	160.00	8.00	15.24	26.85	49.40	38.00	1.55	0.30	THEIS •
134	90.00	7.00	10.20	25.64	66.53	15.00	1.00	0.13	JACOB
149	50.00	5.00	10.20	20.52	29.04	6.50	N.I.	0.16	
237	120.00	8.00	15.24	29.95	46.66	40.00	2.10	0.39	THEIS
252	100.00	7.00	15.24	35.28	41.88	40.00	5.81	0.33	JACOB •
279	100.00	8.00	15.24	32.26	44.11	13.00	1.15	0.23	THEIS
316	110.00	9.00	15.24	43.14	55.30	22.00	1.25	0.39	THEIS •
325	135.00	11.00	15.24	44.00	80.37	25.00	N.I.	0.44	
367	114.00	8.00	10.20	45.67	63.12	15.00	1.14	0.37	JACOB
369	116.00	3.00	17.78	39.67	69.42	23.00	0.21	0.38	THEIS
371	114.00	5.00	10.20	39.80	66.15	10.00	N.I.	0.38	

151

RESUMEN DE PRUEBAS DE BOMBEO DE CORTA DURACION

ESTADO: ZAGATECAS

ZONA: CALERA

152

Pozo No.	Prof. (m)	Tiempo de duración de la prueba (hrs)	Diámetro de descarga (cm)	Nivel Estático (m)	Nivel Dinámico (m)	Caudal (l.p.s.)	Transmisibilidad ( $T \times 10^{-3}$ )	Coef. de Almacenamiento ( $S \times 10^{-3}$ )	Interpretación
402	110.00	5.00	15.24	15.93	75.63	21.00	0.20	N.I.	JACOB
508	80.00	11.00	12.70	43.23	61.75	38.00	1.00	0.26	THEIS
648	160.00	5.00	15.24	38.25	87.66	40.00	N.I.	N.I.	
678	150.00	6.00	15.24	63.66	86.43	24.00	N.I.	0.36	
690	202.00	6.00	15.24	61.54	72.65	24.80	N.I.	N.I.	
698	200.00	9.00	15.24	60.45	71.92	22.00	N.I.	0.49	
701		6.00	15.24	40.54	55.08	27.50	2.55	N.I.	JACOB
705	400.00	5.00	15.24	46.32	90.43	24.00	1.56	0.12	JACOB
736	300.00	6.00	15.24	28.82	52.48	60.40	5.70	N.I.	JACOB
770	246.00	7.00	15.24	23.36	38.45	42.00	2.03	0.75	THEIS
777	218.00	4.00	15.24	18.00	40.52	44.66	N.I.	N.I.	
811	125.00	6.00	15.24	45.60	49.12	32.00	11.40	0.31	JACOB
812	100.00	6.00	9.16	39.30	58.54	14.50	1.00	0.33	THEIS
823	112.00	7.00	10.20	27.93	86.52	14.00	N.I.	0.33	
931	150.00	5.00	15.24	28.85	85.85	15.00	0.82	0.49	JACOB

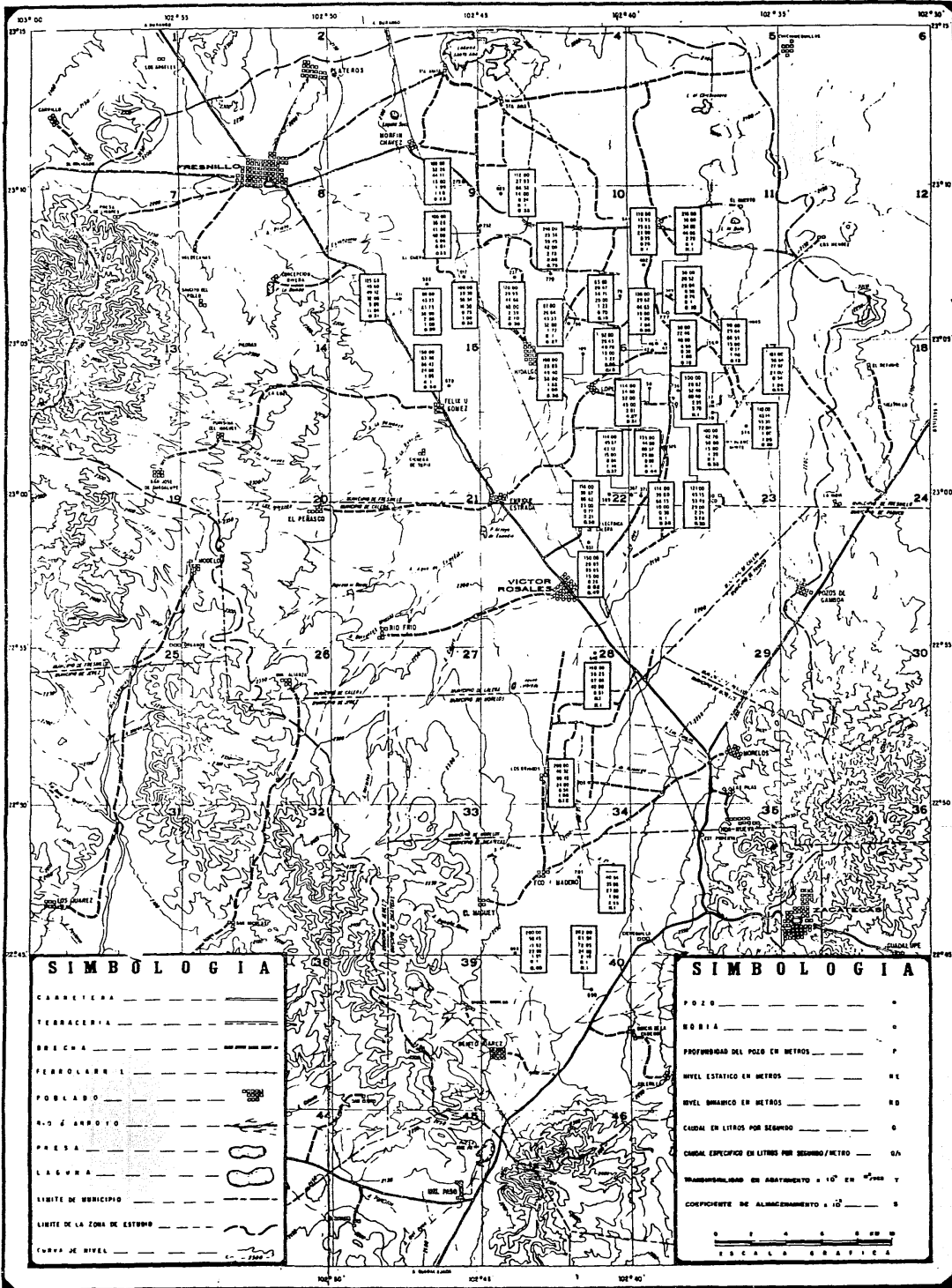
• La interpretación de estas pruebas de bombeo se presentaron en el apartado IV-10.10

N.I. = No Interpretable

Transmisibilidad en  $m^2/seg$  y Coef. de almacenamiento adimensional.



# LOCALIZACION DE APROVECHAMIENTOS CON PRUEBAS DE BOMBEO



## SIMBOLOGIA

CARRERA	— — — — —
TERRACERIA	— — — — —
BRUJA	— — — — —
FERRALLARIL	— — — — —
POBLADO	— — — — —
RIO Y ARROYO	— — — — —
PRESA	— — — — —
LIGERA	— — — — —
LIMITE DE MUNICIPIO	— — — — —
LIMITE DE LA ZONA DE ESTUDIO	— — — — —
CURVA DE NIVEL	— — — — —

## SIMBOLOGIA

POZO	○
ROBIA	○
PROFUNDIDAD DEL POZO EN METROS	P
NIVEL ESTADICO EN METROS	NE
NIVEL DINAMICO EN METROS	ND
CAUDAL EN LITROS POR SEGUNDO	Q
CAUDAL ESPECIFICO EN LITROS POR SEGUNDO/METRO	QA
PERMEABILIDAD EN ARABIGOS EN $10^{-2}$ EN $cm^2$	P
COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO $\times 10^{-2}$	S



## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la época en que se inicio el aprovechamiento de los acuíferos a gran escala prácticamente se carecía de estudios acerca de sus características y renovación. Este desconocimiento dió lugar a que se sobreestimaré el recurso hidráulico disponible en el subsuelo; y así bajo, la presión de las necesidades de agua, se inicio la sobreexplotación de algunos acuíferos. El descenso progresivo de los niveles del agua fue el efecto inmediato, y de este derivaron: el incremento de los costos de bombeo, la inutilización de captaciones y la disminución de su rendimiento, la intrusión salina en los acuíferos costeros, la formación de grietas y el asentamiento del terreno, daños ecológicos; siendo estos tan sólo algunos de los problemas que actualmente esta padeciendo nuestro país.

Los aspectos antes señalados constituyen base suficiente para concluir que siendo el agua subterránea recurso vital para el desarrollo del país, es imperativo prestar -

especial atención a su estudio como base indispensable --- para administrarla y preservarla. Por tal razón, uno de -- los objetivos de esta Tesis, fue el de dar un panorama general de conocimientos respecto a las pruebas de bombeo, - que son indispensables para llegar a conocer las caracte-- rísticas hidráulicas y así poder predecir el comportamiento de los acuíferos, constituyendo estas pruebas tan sólo una parte de la geohidrología, que junto con otras ciencias -- tiene como fin estudiar el recurso hidráulico subterráneo.

Sin embargo, el estudio del agua subterránea en México debe corregir algunas carencias en tres aspectos principales y que son:

1. Información básica. Siendo los pozos la principal fuente de información acerca del subsuelo, en muchas zonas en que existe un gran número de ellos, los datos recolec-- tados han sido en general escasos y en ocasiones poco con-- fiables. Sin embargo, la explotación y observación por par-- te de algunas dependencias oficiales y particulares han -- cubierto parcialmente tal deficiencia, aunque la falta de instrumentación adecuada sigue siendo factor limitante en el estudio de los recursos hidráulicos.

2. Conciencia de la importancia del problema. La falta de conciencia del problema geohidrológico es muy gene-- ralizado y obstaculiza la aplicación de las medidas perti-- nentes para preservar el recurso hidráulico subterráneo. La creencia arraigada de que el subsuelo es una fuente ina-- gotable, ha creado una falta de conciencia sobre la impor-- tancia del agua, ya que esta desperdiciada irracionalmente

debido a que se disfruta gratuitamente o a un costo que -- resulta simbólico tratándose de un elemento vital.

3. Personal técnico especializado. Aunque actualmente se esta dando mayor énfasis a la preparación de profesionistas inclinados por esta área, en el pasado dicho personal no fue aprovechado adecuadamente.

Como se menciona anteriormente, las pruebas de bombeo proporcionan información del acuífero para conocer su comportamiento con respecto a las extracciones y en base al balance hidrológico obtener la recarga. Por tal motivo, se realizaron pruebas de bombeo en la zona de Calera de Victor Rosales (ver apartado IV-10), en las que se interpreto que la ubicación de los mayores valores de los coeficientes de transmisibilidad y almacenamiento, coinciden con la zona en la que los rellenos de materiales granulares presentan mayor desarrollo, ya que en estas porciones de acuerdo a las exploraciones realizadas se sabe que alcanzan más de 400 metros de profundidad. Los valores menores en su mayoría estan determinados por las zonas de materiales finos y el espesor reducido del acuífero.

Las características hidrogeológicas de las formaciones que constituyen la zona son muy variables y se distinguieron las siguientes:

I. Formaciones permeables. Principalmente estan constituidas por depósitos aluviales que abarcan todos los sedimentos que rellenan la cuenca y desde el punto de vista geohidrológico éste conjunto de materiales son el principal

acuifero de donde se extrae prácticamente toda el agua que abastece a la zona en sus diferentes necesidades.

II. Formaciones poco permeables. Dentro de este grupo se encuentran las tobas de origen riolítico, calizas y depósitos residuales. Se consideran con posibilidades acuíferas estas formaciones, como se pudo comprobar en algunos pozos perforados en la zona.

III. Formaciones impermeables. Las riolitas y basaltos, dadas las características que presentan en la zona, son consideradas impermeables.

Puesto que en el valle de Calera la extracción que se realiza es aproximadamente dos veces mayor que la recarga que recibe, el acuifero se encuentra sometido a una severa sobreexplotación, agravada por la excesiva concentración de los aprovechamientos en su porción norte, entre Calera de Victor Rosales y Santa Ana, lo que ha originado varios conos de depresión de los niveles piezométricos, así como su descenso progresivo y acelerado, los que se pueden observar en las pruebas de bombeo realizadas en dichos aprovechamientos.

Considerando que el valle de Benito Juárez se encuentra en equilibrio debido a que la recarga es igual a la extracción que se lleva a cabo en la zona, lo que se puede notar por los elevados valores de los coeficientes de almacenamiento y transmisibilidad de los pozos ubicados en tal zona.

Lo recomendable para que el acuífero del valle de Calera de Victor Rosales no continúe en un proceso de sobre-explotación, es no incrementar la extracción en el valle, ya sea con las captaciones que existen o bien mediante la construcción de nuevos aprovechamientos. Lo conveniente sería hacer una redistribución del bombeo, disminuyéndolo en las áreas de mayor extracción e incrementándolo en las zonas con menor densidad de aprovechamientos.

También contribuyen a reducir el volumen de extracción la tecnificación de los métodos de riego, así como la utilización de cultivos que requieren poco consumo de agua.

Si se llevan a cabo las medidas antes mencionadas se podrá reducir la extracción que se realiza en la zona de mayor concentración de bombeo, ya que con la tendencia de abatimiento que presentan los niveles del agua, serán cada vez mayores las profundidades de bombeo, con el consiguiente incremento en su costo, así como porque ello traerá --- aparejado la inutilización de las captaciones de menor profundidad.

Considerando que el valle de Benito Juárez se encuentra en equilibrio, es factible incrementar la extracción - en forma gradual y continuar con las observaciones del comportamiento de los niveles del agua para precisar en que medida es permisible incrementar la extracción.

En ambos casos es necesario seguir de cerca el comportamiento del acuífero por medio del conocimiento de las --

características constructivas e hidráulicas de éstos a partir de estudios geohidrológicos de la zona y dentro de los cuales estan comprendidas las pruebas de bombeo.

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

1. Hidráulica Subterránea  
S. W. Lohman  
Ediciones Ariel
  
2. Apuntes del Curso de Exploración, Cuantificación  
y Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos Subte-  
rráneos  
División de Educación Continua - Facultad de In-  
geniería - U.N.A.M.
  
3. Hidrogeología  
Stanley N. Davis y Roger J. M. Wiest  
Ediciones Ariel
  
4. Hidrología Subterránea  
Emilio Custodio y Manuel Llamas  
Ediciones Omega, S.A.
  
5. Captación de Aguas Subterráneas  
Alberto Benítez  
Editorial Dossat, S.A.



**6. La Captación de Aguas Subterráneas**

**Jean Pimienta**

**Editores Técnicos Asociados, S.A.**

**7. Aspectos Generales de la Hidráulica de Pozos**

**Israel Velasco Velasco**

**Universidad Autónoma de Chapingo**

**8. Estudio Geohidrológico de la Zona de Calera de**

**Victor Rosales, Estado de Zacatecas**

**Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas**

**Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos**