

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

**Ejecución e Interpretación de Pruebas de  
Bombeo de Corta Duración (Limitaciones y  
Ventajas en su Utilización en Estudios  
Geohidrológicos)**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**I N G E N I E R O C I V I L**

p r e s e n t a :

**GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-365  
T.E.

Señor GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ,  
P r e s e n t e .

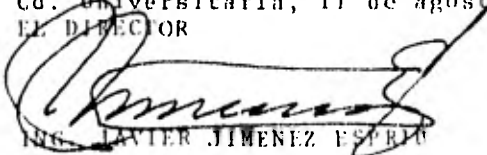
En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Profesor Ing. Jaime A. Tinajero González, para que lo desarrolle como tesis para su Examen Profesional de la carrera de Ingeniero CIVIL.

"EJECUCION E INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO DE CORTA DURACION (LIMITACIONES Y VENTAJAS EN SU UTILIZACION EN ESTUDIOS GEOHIDROLOGICOS)"

1. Introducción.
2. Teorías de flujo del agua subterránea.
3. Soluciones en hidráulica de pozos.
4. Aplicación en pruebas de bombeo reales.
5. Conclusiones.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Coordinación de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, 11 de agosto de 1982  
EL DIRECTOR

  
ING. JAVIER JIMENEZ ESPRIU

## I N D I C E

I	INTRODUCCION
II	TEORIAS DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRANEA
2.1	Ley de Darcy
2.2	Apartados principales en el estudio del movimiento del agua subterránea
2.3	Estructura de las rocas
2.4	Coefficiente de permeabilidad
2.5	Transmisibilidad
2.6	Ecuación fundamental de conservación de la masa
2.7	Hipótesis de Dupuit
III	SOLUCIONES EN HIDRAULICA DE POZOS
3.1	Flujo radial permanente hacia un pozo
3.2	Método de Theis
3.3	Método de Jacob
3.4	Constantes de formación en acuíferos semiconfinados y libres
3.5	Comentarios a las interpretaciones de pruebas de bombeo

IV	APLICACION EN PRUEBAS DE BOMBEO REALES
4.1	Realización de las pruebas de bombeo
4.2	Ejecución de la prueba de bombeo
4.3	Interpretación de pruebas de bombeo localizadas en el Valle del Yaqui, Sonora.
V	CONCLUSIONES

# C A P I T U L O 1

## INTRODUCCION

Siempre se ha juzgado de inminente la búsqueda del agua para sus distintas aplicaciones, entre éstas se pueden citar el abastecimiento de agua potable, la cual va siendo cada vez más crítica a medida que las demandas de las poblaciones crece, debido a la competencia entre los distintos usuarios como son los agricultores, los ganaderos, los industriales etc.

Uno de los métodos aplicables para la búsqueda de este recurso, lo constituye " La perforación de pozos " en formaciones que contengan agua suficiente para satisfacer los requerimientos.

Un aspecto importante que influye en el funcionamiento adecuado de los pozos, lo constituyen las características hidráulicas de los acuíferos, las cuales se obtienen mediante pruebas de bombeo, que consisten en observar los efectos ( abatimientos ) provocados en los niveles piezométricos de un acuífero por el bombeo de un pozo, los abatimientos se observan en el pozo de bombeo y en pozos próximos a él (de observación).

Las pruebas de bombeo se realizan de preferencia en: aprovechamientos seleccionados, en base a su ubicación en la zona, a sus características constructivas e hidráulicas y en toda condición favorable para una buena observación del comportamiento.

La teoría de la Hidráulica de pozos es el punto de partida para la determinación de las características Hidrodinámicas del acuífero en estudio.

El presente trabajo, trata sobre la ejecución e interpretación de pruebas de bombeo de corta duración ( limitaciones y ventajas ) y como aplicaciones, se anexan algunas pruebas de bombeo de larga y corta duración realizadas en el estado de Sonora.

## C A P I T U L O II

### TEORIAS DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRANEA EN MEDIOS POROSOS.

#### 2.1 Ley de Darcy

El agua en su infiltración a través de los estratos del subsuelo, se des<sup>plaza</sup> desde los niveles mas altos a los mas bajos, debido a esta diferencia de niveles y también a la diferencia de presiones, el agua lleva determinada energía, la energía Cinética que lleva, suele despreciarse debido a que el movimiento Laminar Subterráneo es bajo; El agua subterránea en su recorrido por el medio granular, sufre una pérdida de energía debido al rozamiento con las partículas, en acuíferos arenosas, la pérdida de energía por unidad de longitud de la distancia recorrida se le llama gradiente Hidráulico ( $i$ ), el cual es proporcional a la velocidad del agua Subterránea (Ley de Darcy ).

Hagen y Poiseville, realizaron los primeros experimentos acerca del movimiento del agua subterránea a través de conductos tubulares llenas de arena, pero Darcy y Dupuit, establecieron la similitud entre el movimiento del agua subterránea y el movimiento Laminar a través de tubos también llenos de arena.

Darcy se ocupó más sobre la investigación del rozamiento en las fórmulas del movimiento a través de tubos, mediante un experimento que realizó con un tubo vertical lleno de arena y de sección transversal  $A$ , como se observa en la fig, 1



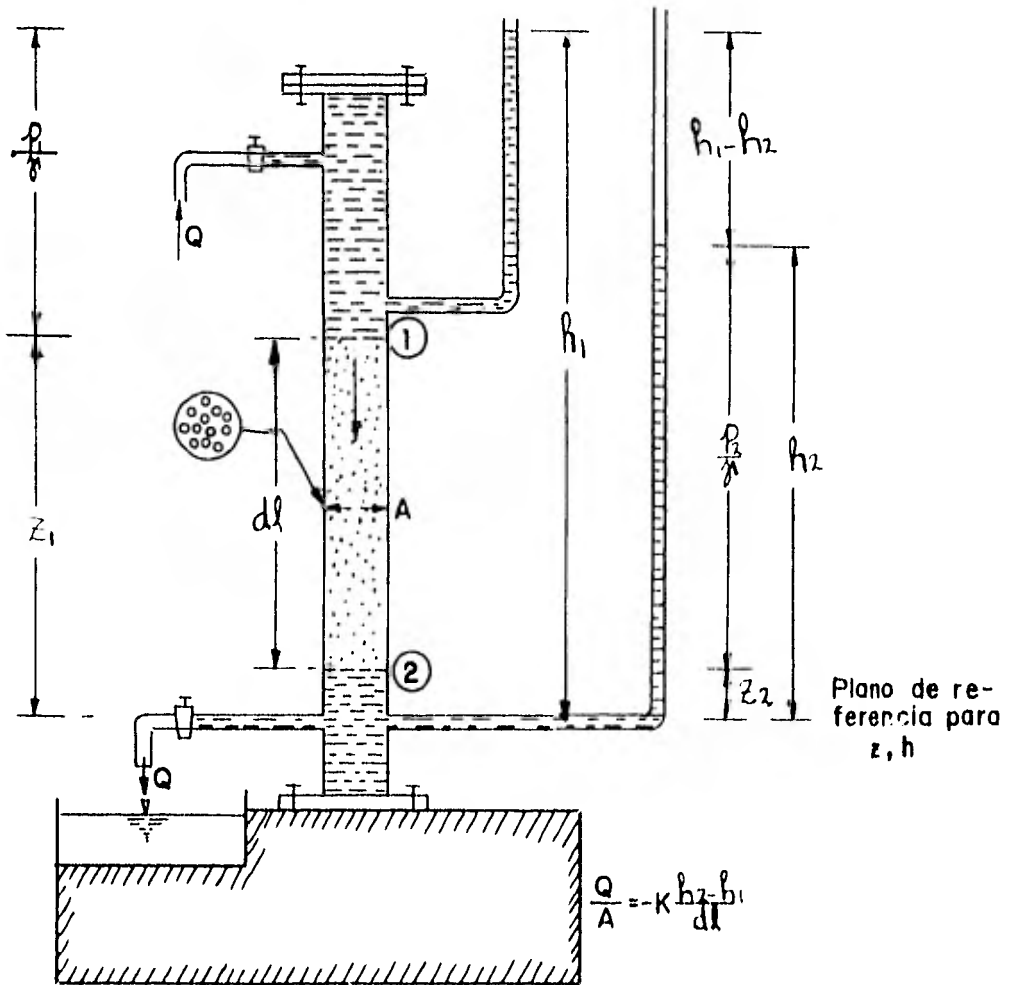


FIG. 1.— Dispositivo para demostrar la ley de Darcy.

Darcy concluyó diciendo que: En el movimiento del agua a través de lechas de arena estratificadas horizontalmente, el caudal  $Q$ , era inversamente proporcional a la longitud del camino recorrido, y directamente proporcional a la pérdida de energía y a un coeficiente  $K$ , que depende de la naturaleza de la arena. Claro, esto se cumplía si durante el proceso se mantenía el régimen laminar.

La ley de Darcy se expresa como sigue.

$$V = Ki \quad (1)$$

Donde

$V$  = Velocidad media de flujo

$K$  = Coeficiente de permeabilidad

$i$  = Gradiente Hidráulico

Con base en el principio de conservación de la masa, que se verá mas adelante se puede decir que :

$$\begin{aligned} Q &= K A \frac{(h_1 - h_2)}{dl} \\ &= K A \frac{dh}{dl} = K A S \quad (2) \end{aligned}$$

Donde

$$h = z + \frac{p}{\gamma} + \text{constante}$$

$h$  = Representa la energía por unidad de peso del fluido, en este caso que es agua, se le llama nivel piezométrico.

$z$  = Es la elevación con respecto a un plano de referencia arbitraria.

$p$  = Es la presión soportada por el fluido contenido en los poros del medio.

$\gamma$  = Es el peso específico del fluido

$S$  =  $i$  ( Gradiente hidráulico del agua )

Si la agrupación de los granos del medio porosa, forman un conjunto geométrico de tubos prismáticos comunicados entre si, entonces el movimiento del agua subterránea se podría estudiar microscópicamente bajo las leyes de la hidrodinámica, pero lejos de esto, el agua recorre caminos sinuosos y ramificados.

Darcy admite las siguientes hipótesis para la obtención de su fórmula.

a). Admite una velocidad ficticia, llamada velocidad de Darcy o bien, el caudal específico que pasa a través de una sección transversal dada del medio poroso, en vez de la velocidad real entre los granos.

b) Admite los valores hidráulicos promedios, en vez de los valores hidrodinámicos locales de esta velocidad, ya que en el tubo cilíndrico lleno de arena sólo se podían medir los valores hidráulicos promedios.

Dupuit también dedujo la fórmula de Darcy (ec. 1) considerando el flujo del agua a través de un canal lleno de arena, pero se apoyó en la teoría del movimiento uniforme; después de su deducción, concluyó diciendo que, "El hecho de que ámbos hayan caído en la misma ecuación, quiere decir que, hay similitud entre el movimiento uniforme y el laminar".

## 2.2 APARTADOS PRINCIPALES EN EL ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRANEA.

El estudio del movimiento del agua subterránea, puede dividirse en subestudios que traten de su carácter dimensional, de su dependencia del tiempo, de los límites de la región o dominio del movimiento y de las propiedades del medio y del fluido.

### 2.2.a CARACTER DIMENSIONAL

El movimiento del agua en la naturaleza, es tridimensional, pero para analizarlo bajo este carácter es imposible resolverlo a menos que sus características de simetría permitan reducir sus dimensiones a dos ó a una si es posible.

### 2.2.b DEPENDENCIA DEL TIEMPO

Generalmente las incógnitas de los problemas en el movimiento del agua subterránea vienen siendo la velocidad, la presión, la densidad, la temperatura y la viscosidad del agua.

En el recorrido del agua subterránea por las formaciones geológicas, presenta ciertas incógnitas al tratar de evaluar cuantitativamente su movimiento, estas incógnitas son la velocidad, la presión, la densidad, la temperatura y la viscosidad del agua, las cuales pueden variar en cada punto de la formación y con el tiempo; si -

- las incógnitas dependen solamente del punto es decir de las variables  $x, y, z$ , entonces el movimiento es en régimen permanente o estacionario, por el contrario, si las incógnitas dependen también del tiempo, el movimiento es en régimen no permanente, no estacionario o variable

#### 2.2 c. LIMITES DEL DOMINIO DEL MOVIMIENTO

El movimiento del agua subterránea se llama confinado o cautivo, cuando los límites confinantes del medio a través del que circula el agua, permanecen fijos para los diferentes estados del movimiento

Se llama no confinado, o libre, cuando tiene una superficie libre, cuya posición varía con el estado del movimiento, a veces se le llama movimiento en condiciones fráticas

#### 2.2 d. PROPIEDADES DEL MEDIO Y DEL FLUIDO

Un medio se llama isótropo, cuando sus propiedades en cada punto son iguales en todas sus direcciones, se llama Anisótropo cuando sus propiedades dependen de la dirección elegida; un medio es heterogéneo cuando sus propiedades o condiciones de isotropía o anisotropía varían de un punto a otro punto, es homogéneo cuando sus propiedades o condiciones de isotropía o anisotropía son iguales en todos los puntos del medio; por lo tanto, un medio puede ser isótropo y heterogéneo al mismo tiempo

#### 2.3 ESTRUCTURA DE LAS ROCAS

El suelo y las rocas, componen el medio poroso por el cual circula el agua subterránea, bajo las fuerzas de gravedad, de presión, etc; el medio poroso está constituido por granos que forman huecos, poros o intersticios, los cuales a veces están llenos de agua, gases o de materia orgánica, todo medio poroso, está constituido por una parte de volumen total ( $V_0$ ), un volumen de partículas sólidas y una parte de volumen de huecos ( $V_v$ ); siendo la porosidad ( $\eta$ )

$$\eta = \frac{V_v}{V_0} \quad (3)$$

La porosidad de los materiales consolidados, depende del grado de cementación, del estado de disolución y de la fracturación de la roca; En los materiales sueltos depende del grado de compactación de los granos, de la forma, del tipo de empaquetamiento y de la distribución por tamaños.

## 2.4 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD K

El coeficiente de permeabilidad K, depende de las propiedades del fluido, así como de las características del medio; dentro de las propiedades del fluido podemos decir que K, es función del peso específico  $\gamma$  del fluido, de su viscosidad dinámica  $\mu$  etc. . Ahora, el agua subterránea que se desplaza con velocidades comprendidas entre moderadas y altas, facilita la disolución o precipitación de componentes disueltos, los cambios de presión o de temperatura pueden producir la liberación de gases que obstruyan el espacio poroso, alterando así el coeficiente de permeabilidad del medio.

La permeabilidad K, puede obtenerse por medio de permeámetros y por medio de pruebas de bombeo (la más usual).

## 2.5 TRANSMISIVIDAD

La transmisividad es una propiedad de los acuíferos y se define como el caudal que pasa a través de una franja vertical del acuífero, con un ancho unitario, considerando todo el espesor saturado del mismo, bajo la acción de un gradiente hidráulico y a la temperatura del agua reinante; su valor viene dado por:

$$T = Kb \quad (4)$$

Donde

T = Coeficiente de Transmisividad

K = Coeficiente de Permeabilidad

b = Espesor Saturado

## 2.6 ECUACION FUNDAMENTAL DE CONSERVACION DE LA MASA

Considérese un paralelepípedo elemental de un medio poroso (figura 2), saturado completamente de fluido de densidad  $\rho$ . Las componentes de la velocidad o caudal específico por unidad de área son:  $u(x,y,z,t)$ ,  $v(x,y,z,t)$ ,  $w(x,y,z,t)$  correspondiendo a la dirección y sentido de los ejes coordenados x, y, z, respectivamente.

En cada superficie del paralelepípedo, se calcula el caudal que la cruza, referido al centro P ó a sus componentes:  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , en P; ésto se realiza mediante un desarrollo en serie de Taylor de las componentes arriba señaladas, y como son funciones de más de una variable, es necesario introducir el concepto de derivada parcial para tal fin.

El principio de conservación de la masa aplicado al elemento de volumen requiere que:

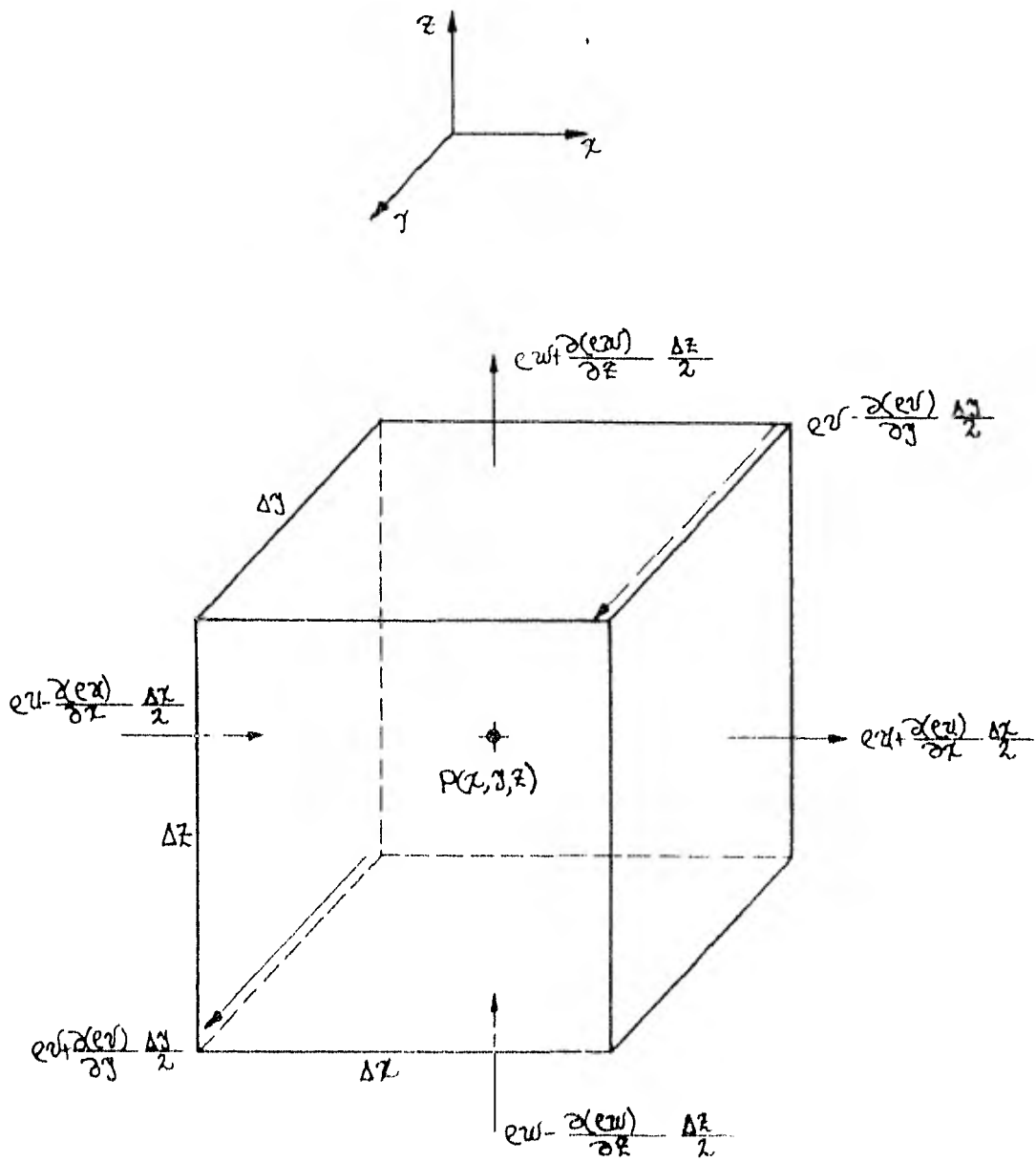


FIG 2 — Paralelepípedo elemental de un medio poroso completamente saturado.

Masa del caudal que entra = Masa del caudal que sale + Variación de la masa almacenada durante el tiempo considerado.

La masa del fluido que entra según las distintas direcciones:

$$\text{Dirección } x \left[ \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \Delta y \Delta z$$

$$\text{Dirección } y \left[ \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta x \Delta z$$

$$\text{Dirección } z \left[ \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{\Delta z}{2} \right] \Delta x \Delta y$$

Análogamente, para la masa del caudal que sale, las distintas direcciones son:

$$\text{Dirección } x \left[ \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \Delta y \Delta z$$

$$\text{Dirección } y \left[ \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right] \Delta x \Delta z$$

$$\text{Dirección } z \left[ \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{\Delta z}{2} \right] \Delta x \Delta y$$

Sumando para obtener el total, se deduce que:

Masa del fluido que entra - masa del fluido que sale =

$$= - \left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z$$

Es decir, igual a la variación  $\Delta M$ , durante el tiempo considerado de la masa del fluido almacenado en el elemento de volumen  $\Delta V$ .

A su vez

$$\Delta M = \eta \rho \Delta x \Delta y \Delta z$$

Para establecer la variación temporal de  $\Delta M$ , se considera que la porosidad ( $\eta$ ) puede variar debido a la compresión vertical o a la expansión del medio, y  $\rho$  puede ser función del tiempo y del punto; admitamos también que no hay cambio en las dimensiones  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y  $\Delta z$  del volumen considerado.

Por lo tanto:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \left[ \rho \frac{\partial \eta}{\partial t} + \eta \frac{\partial \rho}{\partial t} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \quad (5)$$

Si en esta ecuación (5), expresamos el segundo miembro en función de la compresibilidad  $\alpha$  del acuífero, de la compresibilidad  $\beta$  del fluido y de la presión

intersticial  $p$ , se llega a :

$$\frac{\partial(\Delta p)}{\partial t} = [\rho(1-\eta)\alpha + \eta\rho\beta] \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial p}{\partial t}$$

y de la ecuación de continuidad, se obtiene:

$$-\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}\right] = \rho[(1-\eta)\alpha + \eta\beta] \frac{\partial p}{\partial t} \quad (6)$$

Para llegar a la ecuación del movimiento en un medio homogéneo e isótropo, se desarrolla el primer miembro de la ecuación (6). Además se debe tomar en cuenta que la Ley de Darcy puede expresarse de la siguiente manera:

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v = -k \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$w = -k \frac{\partial h}{\partial z}$$

finalmente se llega a :

$$k\rho\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right) + 2k\rho\rho^2g\left[\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z}\right] =$$

$$= \rho^2g[(1-\eta)\alpha + \eta\beta] \frac{\partial h}{\partial t}$$

Expresándola en forma Laplaciana

$$\nabla^2 h - 2g\beta\rho \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{S_s}{k} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (7)$$



Siendo ésta, la ecuación general del movimiento no estacionario no permanente o transitorio en acuíferos libres.

En donde:

$$S_s = \rho g [(1-\eta)\alpha + \eta\beta]$$

Almacenamiento específico

$$(1-\eta)\rho g \alpha$$

Agua del almacenamiento, liberada por unidad de volumen, debido a la compresión del esqueleto intergranular, cuando el potencial disminuye una unidad.

$$\rho g \eta \beta$$

Agua del almacenamiento, liberada por unidad de volumen, debido a la descompresión del agua, cuando el nivel piezométrico desciende en una unidad.

$$S_s$$

Almacenamiento específico

Sabemos que:

$$S = S_s b$$

Coefficiente de almacenamiento

$$T = Kb$$

Coefficiente de transmisividad

Por lo tanto el operador laplaciano, también puede escribirse como:

$$\nabla^2 h = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

Que también es la ecuación general del movimiento no permanente (o no estacionario) en acuíferos confinados.

Cuando  $h$  es independiente de  $t$ , la ecuación de Laplace (ec. 8) expresa el movimiento confinado en régimen permanente.

Si el acuífero es no confinado, en la ecuación 7, puede despreciarse el término  $\frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t}$ , y si además, la velocidad y la distribución de presión no cambian

con el tiempo, se puede prescindir del término  $\frac{\partial h}{\partial t}$ , por lo tanto:

$$\nabla^2 h = 0 \quad (9)$$

Conocida como la ecuación de Laplace en un acuífero homogéneo e isótropo, tanto para regímenes libres permanentes como no permanentes.

## 2.7 HIPOTESIS DE DUPUIT EN MOVIMIENTO LIBRE O NO CONFINADO

Dupuit estableció su hipótesis para calcular el caudal  $Q$  del agua que circula hacia un pozo, situado en el centro de una isla circular Fig. 3, expresando  $Q$  de la forma:

$$Q = 2\pi r z_f k \frac{\partial z_f}{\partial r} \quad (10)$$

Donde

$Q$  = gasto

$2\pi r$  = Circunferencia de la masa fluida en movimiento

$z_f$  = espesor diferencial de la masa fluida

$k$  = Coeficiente de permeabilidad

Las hipótesis de Dupuit son las siguientes:

- 1.- El movimiento es horizontal
- 2.- La velocidad es uniforme en todo el espesor del acuífero de la masa fluida y a lo largo de la vertical del mismo.
- 3.- La velocidad en la superficie libre puede expresarse como:

$$V = -k \frac{\partial h}{\partial r} = k \frac{\partial h}{\partial r} \quad \text{en vez de} \quad V = -k \frac{\partial h}{\partial s}$$

Donde

$r_i$  Expresa el valor del radio orientado hacia el pozo

$r$  Esta orientado en sentido contrario

$s$  Expresa la trayectoria del movimiento

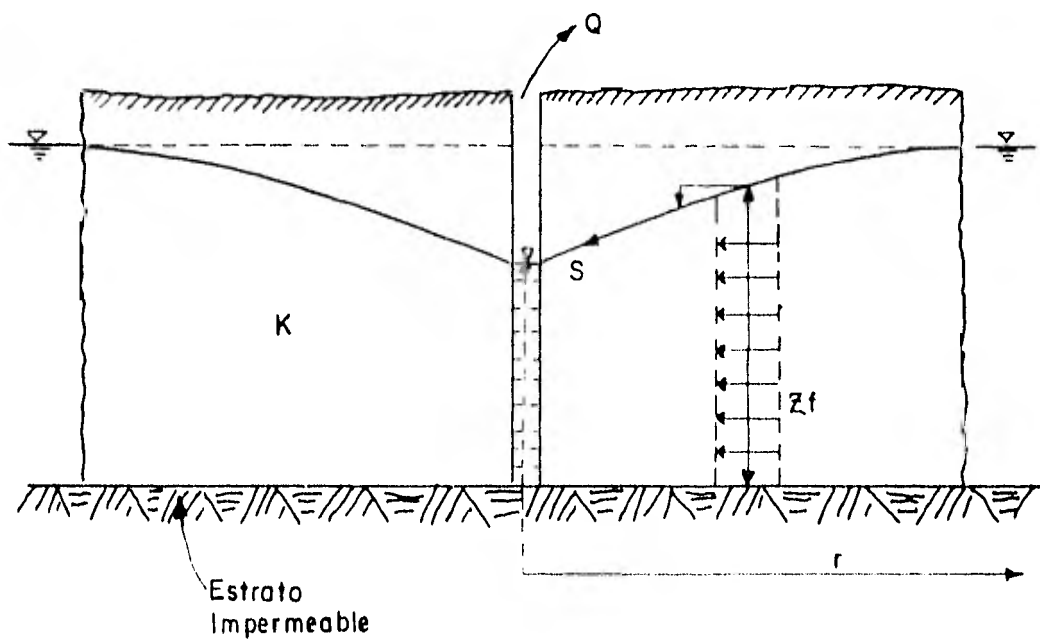


FIG 3 - Hipótesis de Dupuit para el movimiento en un acuífero libre

Forchheimer considera un prisma del medio poroso (Fig. 4), donde las caras inferior y superior, se sitúan en el estrato impermeable y el nivel freático.

Cuando el movimiento del agua subterránea ocurre en el eje  $x$  a través del área elemental,  $h\Delta y$  en  $x$ , puede expresarse como:

$$Q(x) = -K \frac{\partial h}{\partial x} h \Delta y \quad (11)$$

Si  $K$  la suponemos constante, la diferencia entre el caudal que entra y el de salida es:

$$\Delta x \Delta y K \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \Delta x \Delta y K \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} \right)$$

De forma similar, la diferencia entre ambos caudales en la dirección  $y$  vale:

$$K \Delta x \Delta y \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{2} \frac{\partial h^2}{\partial y} \right)$$

Por hipótesis se admite que no existe movimiento en la dirección vertical.

De acuerdo con el principio de continuidad, la diferencia entre el caudal que entra y el caudal que sale, tiene que ser igual a la variación del volumen de agua contenida en el prisma; esta variación es nula si en el interior del prisma existen manantiales.

Por lo tanto

$$\Delta x \Delta y h \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = 0$$

$$\nabla^2 h = 0 \quad (12)$$

Si la infiltración produce una recarga de la superficie freática, la ecuación 12 se modifica, quedando finalmente como:

$$\nabla^2 h + \frac{2W}{K} = 0 \quad (13)$$

Donde

$W$  expresa la recarga por unidad de superficie.

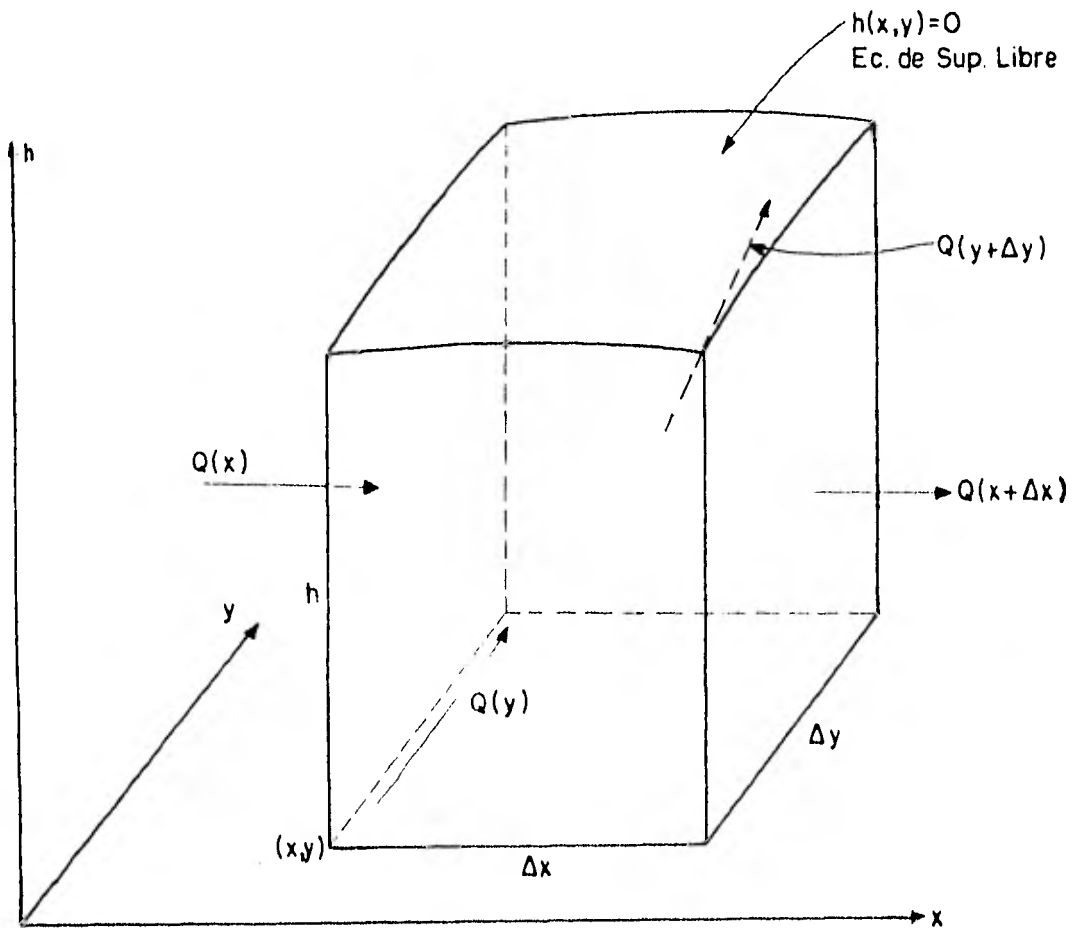


FIG. 4. — Continuidad en un Acuífero libre

## C A P I T U L O   I I I I

### SOLUCIONES EN HIDRAULICA DE POZOS

La hidráulica subterránea, se ocupa del movimiento del agua ya sea éste natural o inducido a través de las formaciones de rocas permeables. El principal método de análisis de la hidráulica subterránea reside en la aplicación de ecuaciones, derivadas para condiciones específicas de resultados de ensayos "in situ" obtenidos generalmente en los pozos de bombeo.

Antes de 1935, las ecuaciones sólo eran conocidas para una condición relativamente sencilla el flujo en régimen permanente, para lo cual se requiere el establecimiento del flujo, lo que significa que el parámetro del tiempo no influye en el comportamiento del agua. Theis al desarrollar en 1935 una ecuación para el flujo en régimen transitorio, marcó un desarrollo más en la hidráulica subterránea, desde esa fecha las ecuaciones y métodos han proliferado con rapidez.

#### 3.1.            FLUJO RADIAL PERMANENTE HACIA UN POZO EN                   REGIMEN ESTABLECIDO EN UN ACUIFERO CAUTIVO

El régimen del flujo del agua subterránea a través de materiales permeables es estacionario, permanente o establecido cuando la distribución espacial del potencial es invariable en el transcurso del tiempo, siendo la expresión matemática que la simboliza la siguiente:

$$\frac{dh}{dt} = 0$$

Esto quiere decir que el cambio de la carga hidráulica,  $dh$ , con respecto al cambio en el tiempo,  $dt$ , es igual a cero, como ya se dijo, no se presenta en la naturaleza, pero es un concepto de suma utilidad para tratar los problemas de flujo natural y en los ensayos de acuíferos en los casos en que se cumple de forma aproximada, tal condición se simboliza:

$$\frac{dh}{dt} \longrightarrow 0$$

Entre las hipótesis que impone esta teoría son:

- a.- El pozo se bombea a caudal constante
- b.- El abatimiento del potencial piezométrico  $h$ , tiene la misma distribución en cualquier sección vertical que incluye el eje del pozo o sea, debe haber simetría radial.
- c.- El espesor saturado es constante
- d.- La superficie piezométrica es horizontal antes de iniciarse el bombeo.
- e.- El abatimiento y el radio de influencia no varían con el tiempo
- f.- El flujo es laminar

La Figura 5 ilustra un ejemplo hipotético de verdadero régimen permanente en un caso de flujo radial. Al bombear en el pozo un caudal constante  $Q$ , se alcanzará el régimen estacionario cuando todo el volumen de agua que inicialmente ocupó el cono de depresión haya sido drenado por gravedad.

Si el pozo atraviesa todo el acuífero confinado, entonces el flujo será paralelo en todos los puntos del estrato impermeable y seguirá las líneas de corriente  $S'$  en sentido opuesto al de los rayos  $r$  que parten del centro del pozo tomado como origen de coordenadas polares planas, es decir  $Q$  será igual al caudal que pasa a través de un cilindro de radio  $r$  y altura  $b$  (espesor del acuífero), de modo que:

$$Q = -K \frac{\partial h}{\partial r} 2\pi r b = K \frac{dh}{dr} 2\pi r b \quad (14)$$

Esta ecuación 14 puede integrarse por separación de variables, puesto que es una ecuación diferencial de primer orden de una variable independiente, bajo las condiciones de:

$$h = H \text{ para } r = r_e \text{ , se llega a :}$$

$$H - h = \frac{Q}{2\pi Kb} \log_e \frac{r_e}{r} \quad (15)$$

Esta ecuación se conoce con el nombre de Ecuación de equilibrio o de Thiem.

Si no se toma en cuenta el límite cilíndrico, donde el nivel piezométrico es constante, situado a la distancia  $r_e$ , la ecuación 15 se puede escribir como sigue:

$$h = \frac{Q}{2\pi Kb} \log_e r + \text{Constante} \quad (16)$$

Esta ecuación No. 16 no es aplicable a radios de influencia excesivamente grandes al pozo de observación.

Si Previamente conocemos los valores de descenso  $h_1$  y  $h_2$  de los niveles piezométricos en dos pozos de observación, situados a distancias respectivas  $r_1$  y  $r_2$  del pozo de bombeo, la ecuación 15 se puede escribir de la siguiente manera:

$$h_1 - h_2 = \frac{Q}{2\pi Kb} \log_e \frac{r_1}{r_2} \quad (17)$$

donde:

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

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

$Q$  = Caudal constante de bombeo

$K$  = Coeficiente de permeabilidad

Log = Logaritmo en base "e"

De esta ecuación 17 podemos determinar el valor del coeficiente de permeabilidad  $K$ , quedando :

$$K = \frac{Q}{2\pi b (h_1 - h_2)} \log \frac{r_1}{r_2} \quad (18)$$

Los pozos de observación, deben estar lo suficientemente cerca del pozo de bombeo para que tengan descensos significativos y medibles.



### 3.1.a FLUJO RADIAL PERMANENTE EN ACUIFEROS LIBRES

El flujo del agua es libre, cuando posee una superficie libre, cuya posición varía con el estado del movimiento, en ocasiones suele llamársele movimiento en condiciones freáticas.

La figura No. 6 ilustra un ejemplo de este caso en particular.

Para este caso  $h$  es la altura del nivel freático, medido desde el estrato impermeable; el flujo permanente en acuíferos libres cumple también con las hipótesis del primer caso (3.1), además, de otras dos que son:

- a.- El espesor saturado inicial del acuífero libre es constante.
- b.- La superficie freática es horizontal antes de iniciarse el bombeo.

La ecuación que rige el descenso del nivel freático se deduce bajo condiciones similares al del caso anterior (3.1), o sea, el pozo penetra totalmente en el acuífero, el acuífero es homogéneo e isotrópico, movimiento laminar y límite coaxial con el pozo a nivel constante.

Según Dupuit el caudal  $Q$  puede expresarse como sigue:

$$Q = 2 \pi r h K \frac{dh}{dr} \quad (19)$$

Esta ecuación ya fue vista anteriormente, tomando los mismos límites de la ecuación 15  $h = H$  para  $r = r_e$  e integrando la ecuación 17, se obtiene:

$$H^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi K} \log_e \frac{r_e}{r} \quad (20)$$

Tomando en cuenta las mismas condiciones de la ecuación No. 15 se llega a:

$$h^2 = \frac{Q}{\pi K} \log_e r + \text{constante} \quad (21)$$

Ahora, si también conocemos descensos  $h_1$  y  $h_2$  de los niveles piezométricos de dos pozos de observación, situados a distancias respectivas  $r_1$  y  $r_2$  del pozo de bombeo, la ecuación 20 se puede escribir de la siguiente manera:

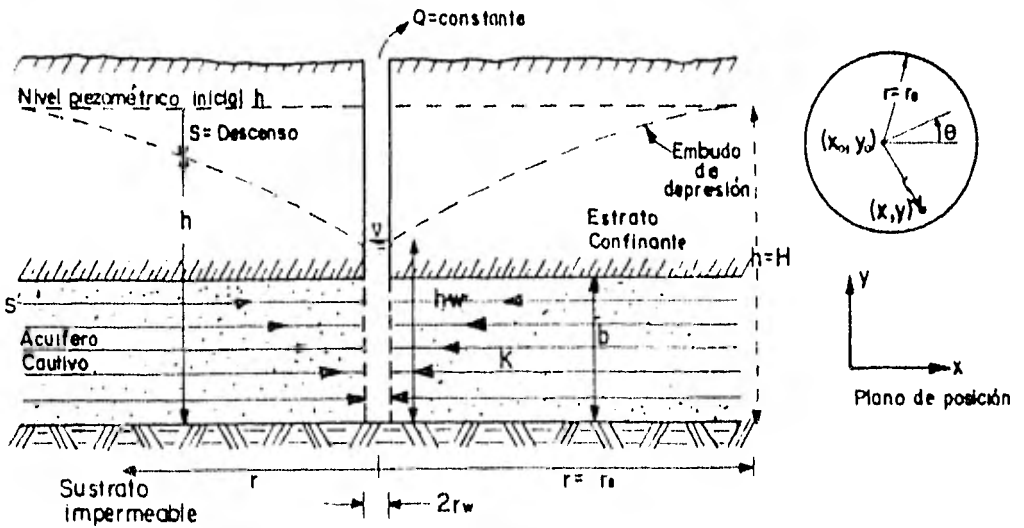


FIG 5 - Movimiento radial hacia un pozo completo ubicado en un acuífero confinado

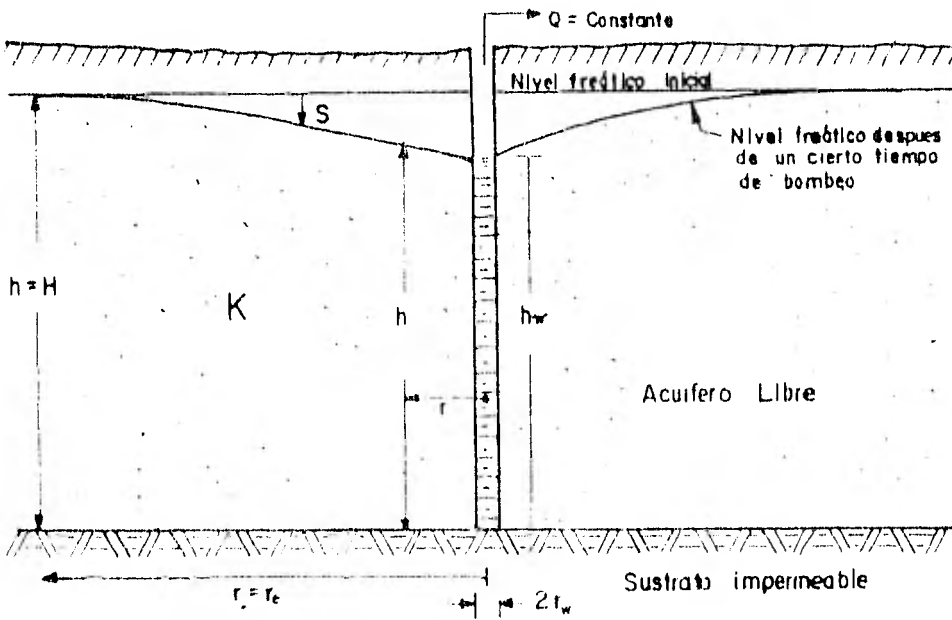


FIG 6 - Movimiento radial en un acuífero libre

$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi K} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (22)$$

Cuyos términos son los mismos que los del caso 3.1. De esta ecuación (22) podemos conocer también el valor del coeficiente de permeabilidad  $K$ .

Aun cuando las fórmulas anteriores (Ecuaciones 17 y 22) son aplicables a algunos casos prácticos, tienen algunas limitaciones como son:

- 1.- No proporcionan ninguna información respecto al coeficiente de almacenamiento del acuífero.
- 2.- No permiten calcular la variación de los abatimientos en el tiempo.
- 3.- No son aplicables al estudio de acuíferos semiconfinados, ni a sistemas de penetración parcial ni a otros que se presentan en la vida práctica.

Por otra parte, su aplicación requiere de dos pozos de observación, próximos al de bombeo, lo cual no siempre es económicamente posible, especialmente cuando el acuífero se encuentra profundo o es de gran espesor.

Las hipótesis primeramente dichas, parecen limitar la aplicación de las fórmulas, pero en realidad no es así, por ejemplo: la permeabilidad media del acuífero es más o menos constante, la superficie piezométrica no es completamente horizontal pero generalmente el gradiente hidráulico es muy pequeño y no afecta sensiblemente la forma de la superficie piezométrica, el flujo es laminar en la mayor parte del área afectada por el bombeo, sólo en las proximidades del pozo de bombeo llega a ser turbulento, después de cierto tiempo de bombeo el flujo llega a ser establecido; para mantener el caudal constante en los pozos de bombeo, es necesario que éstos estén provistos de equipos en condiciones apropiadas de Operación.

Una simetría radial de abatimiento puede verse afectada por:

- 1.- Recargas verticales, ya sean naturales o inducidas
- 2.- Por efectos de la pendiente del nivel freático
- 3.- Por la presencia de fronteras impermeables.

### 3.2 FLUJO DEL AGUA EN REGIMEN TRANSITORIO

#### 3.2.1 METODO DE THEIS

Este problema fue investigado por Theis en 1935 a partir de la analogía que presenta con la conducción de calor por una placa en la que existe un sumidero, Theis desarrolló su fórmula en la cual por primera vez se tomó en cuenta el tiempo de bombeo, con la aplicación de su fórmula es posible predecir el abatimiento para cualquier tiempo de bombeo, determinar la transmisibilidad y la permeabilidad media antes de presentarse la estabilización de los niveles piezométricos en los pozos de observación. La ventaja que presenta en comparación con los casos anteriores es que únicamente es necesario un sólo pozo de observación.

Este método se aplica a acuíferos confinados, horizontales de espesor constante y confinamiento perfecto.

Theis para obtener su fórmula se basó en las siguientes hipótesis (figura No. 7).

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

La fórmula de Theis en su forma más simple es :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(U) \quad (23)$$

donde:

$s$  = Abatimiento a la distancia  $r$  del pozo de bombeo.

$T$  = Transmisividad del acuífero.

$Q$  = Caudal constante de bombeo

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

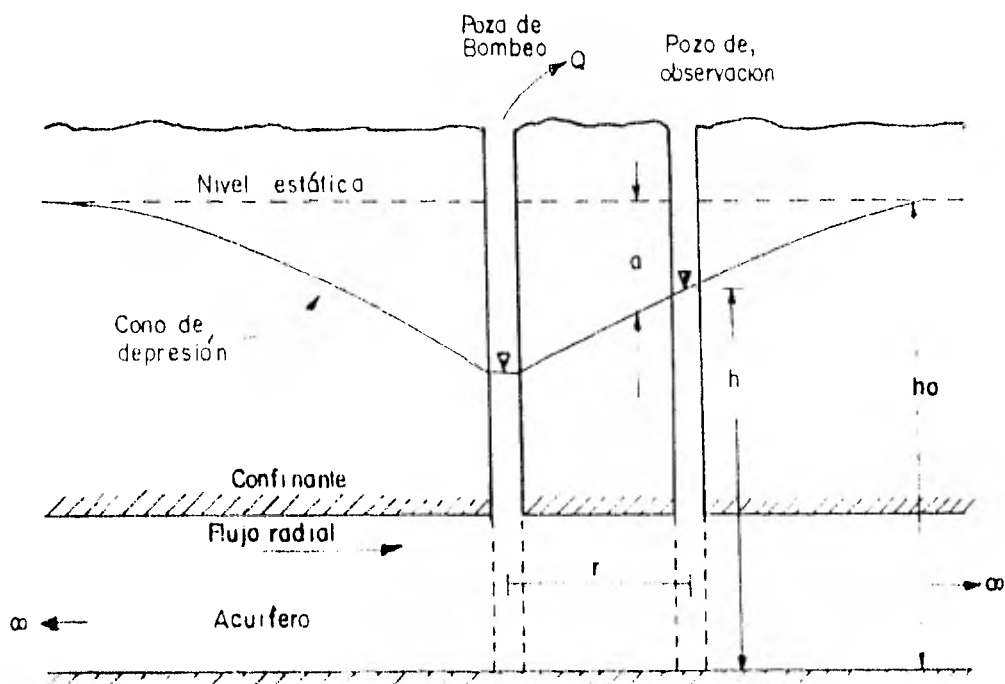


FIG. 7. — Pozo de bombeo totalmente penetrante en acuífero confinado

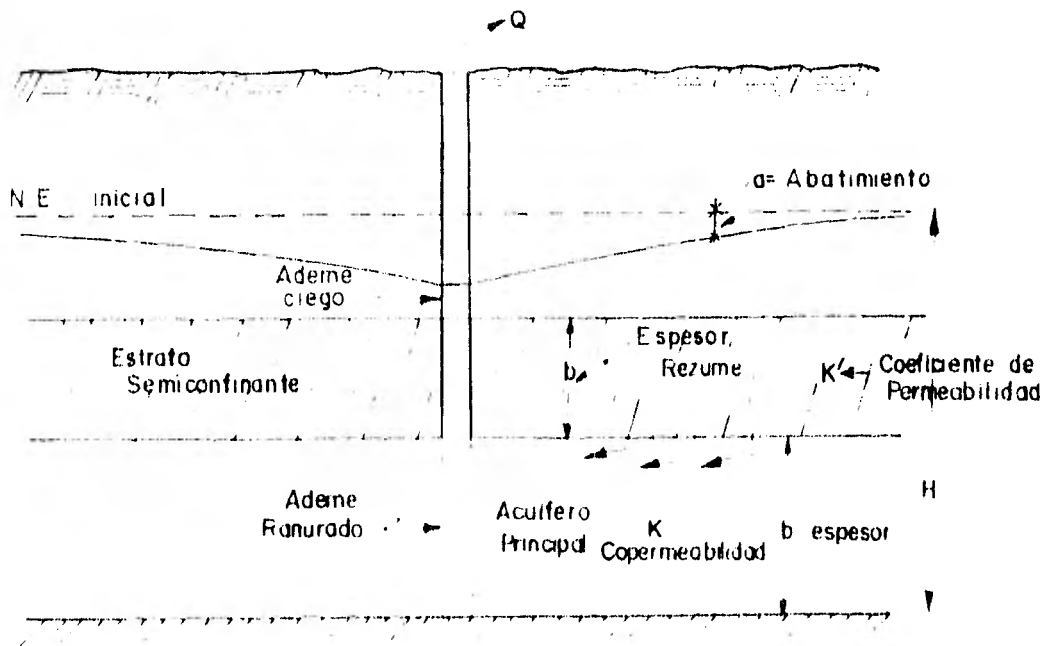


FIG 8 — Esquema de Acuífero Semiconfinado

$$\int_0^u \frac{e^{-u}}{u} du = W(u) = -0.5772 - \log_e u + u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} - \frac{u^4}{4 \times 4!} + \dots$$

En la expresión anterior:

$$u = \frac{r^2 S}{4tT} \quad (24)$$

Donde

r = distancia del pozo de bombeo al de observación

t = tiempo de bombeo

s = Coeficiente de almacenamiento

T = Transmisividad

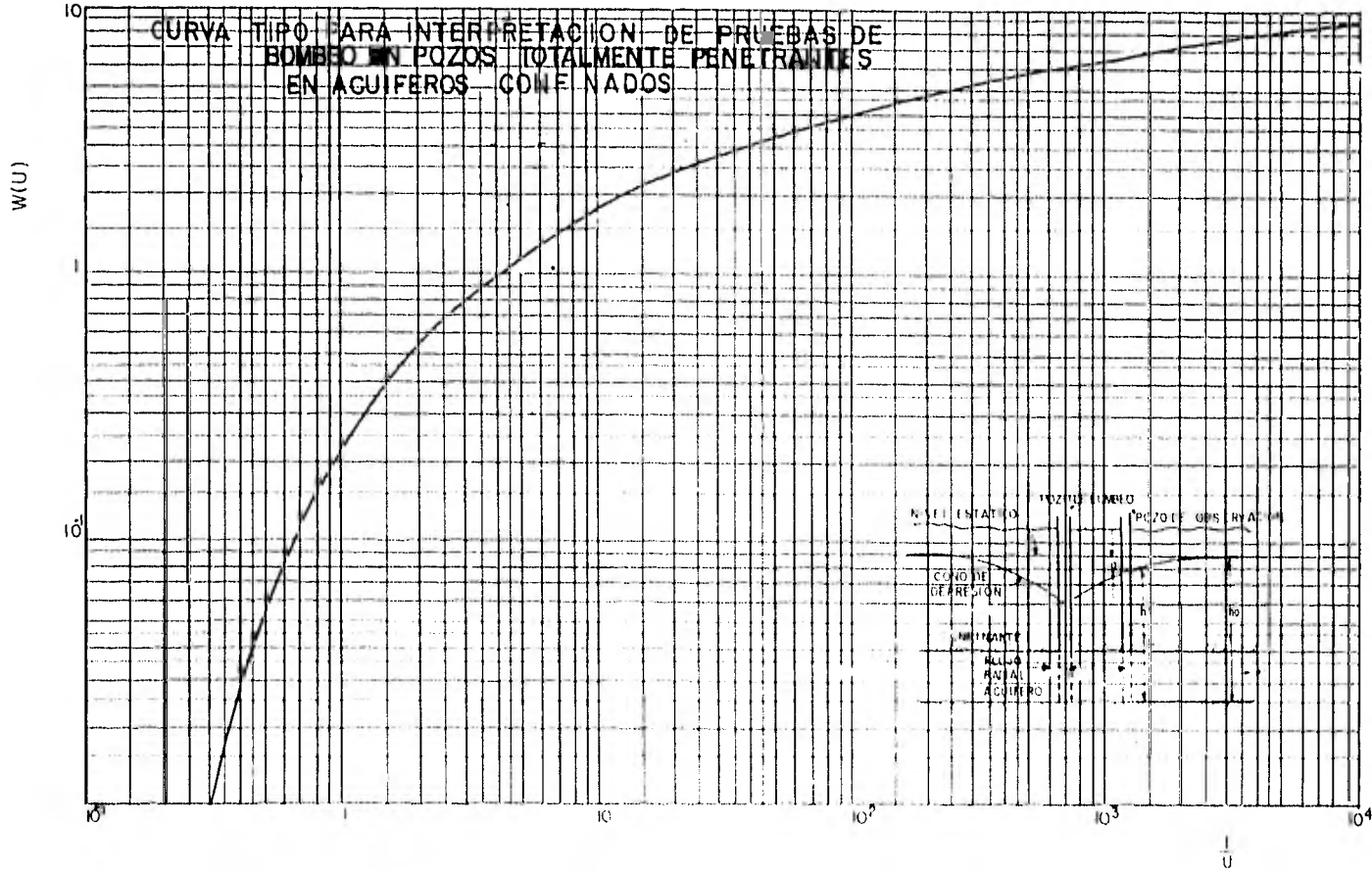
Los valores de la función de pozo en relación con los de U, se encuentran en la Tabla No. 1 (Anexo), los cuales vaciados en una gráfica de W (U) contra 1/U en papel logarítmico, nos dan una curva tipo para interpretar pruebas de bombeo en pozos totalmente penetrantes en acuíferos confinados. (se anexa la curva tipo).

Con la aplicación de la fórmula de Theis, pueden predecirse la transmisividad, el abatimiento en un punto dado para cualquier tiempo de bombeo y la permeabilidad media, pueden determinarse conociendo la variación de los niveles piezométricos al principio de la prueba, sin necesidad de esperar la estabilización de los niveles en los pozos de observación, además, se requiere únicamente de un pozo de observación.

Para determinar la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S), Theis propuso un método que consiste en:

- a.- Trazar la curva tipo W (U) contra 1/U en papel doble logarítmico
- b.- Construir la gráfica abatimiento - tiempo cuando se tenga un solo pozo de observación.
- c.- Superponer las gráficas manteniendo los ejes paralelos, y buscar la coincidencia de la curva de campo y la curva tipo.
- d.- Seleccionar un punto de ajuste, y obtener sus coordenadas, a, W (U),  $r^2/T$  y U.

CURVA TIPO PARA INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO EN POZOS TOTALMENTE PENETRANTES EN ACUIFEROS CONFINADOS



- e.- Sustituir los valores de las coordenadas en las ecuaciones 23 y 24 y despejar T y S.

### 3.2b.- OBSERVACIONES AL TIEMPO DE BOMBEO

En las gráficas de bombeo generalmente se observa que en los primeros tiempos de la prueba se presenta una cierta discrepancia entre las condiciones reales y las hipótesis establecidas para la obtención de la fórmula, ya que existe un ligero retraso entre el abatimiento de la superficie piezométrica y la liberación del agua, cuyo retraso puede ser mayor en esa parte de la prueba, ya que es aquí en donde los niveles del agua dentro del pozo se abaten más rápidamente. Para tiempos mayores de bombeo estas discrepancias se van minimizando y se tiene un mejor ajuste entre la teoría y las condiciones reales.

### 3.3 METODO DE JACOB

Jacob desarrolló un método más sencillo para interpretación de las pruebas de bombeo, quien observó que: Para pequeños valores de U, o sea para r pequeño y/o tiempos grandes, donde  $t > 55 r^2/T$ , la ecuación de Theis puede expresarse como sigue:

$$a = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 Tt}{r^2 S} \quad (25)$$

Esta simplificación hecha por Jacob, es válida para valores de U inferiores a 0.01.

Partiendo de la fórmula 25, Jacob desarrolló su método gráfico de interpretación de las pruebas y que consiste en:

- a.- La Construcción de la gráfica de abatimiento (en escala aritmética) contra tiempo (en escala logarítmica).
- b.- Se pasa una recta por los puntos que más o menos se alinean, ya que los puntos que corresponden a los primeros minutos de la prueba se apartan de la recta, debido a que corresponden a tiempos cortos y no cumplen con la relación de  $t > 55 r^2/T$ , y se determina la pendiente de la recta.
- c.- Si consideramos que la pendiente de la recta de ajuste es m, la transmisividad puede obtenerse de la siguiente ecuación:



$$T = \frac{0.183 Q}{m} \quad (26)$$

d.- Se determina el valor de  $t_0$ , para el cual la prolongación de la recta de ajuste intercepta la línea de abatimiento nulo.

e.- Se calcula el coeficiente de almacenamiento mediante la fórmula siguiente:

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2} \quad (27)$$

El método descrito, es generalmente aplicable cuando se conocen los abatimientos en varios pozos de observación y para diferentes tiempos, en este caso se grafica el abatimiento contra la relación  $t/r^2$  (en escala logarítmica) y se sigue la secuela descrita anteriormente; ahora, Si se conocen los abatimientos en varios pozos de observación pero para un tiempo dado, se grafica el abatimiento contra la distancia (en escala logarítmica), los coeficientes buscados se calculan de acuerdo a las fórmulas que siguen:

$$T = \frac{0.366 Q}{m} \quad (28)$$

$$S = \frac{2.25 T t}{r_0^2} \quad (29)$$

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

Hay veces en que los datos graficados en las curvas abatimiento - tiempo, no se ajustan a la curva tipo de Theis; esto se debe a que algunas de las hipótesis consideradas no se cumplen, por lo que el método descrito no es aplicable; debido a esto, diversos autores han obtenido ecuaciones para diferentes casos como son:

- 1.- Pozos con penetración parcial
- 2.- Pozos en acuíferos freáticos
- 3.- Pozos en acuíferos de extensión limitada
- 4.- Pozos en acuíferos con anisotropía.

Para la interpretación de una prueba de bombeo realizada en cualquiera de los casos descritos anteriormente, se utiliza un método gráfico semejante al que se describió anteriormente, y en el cual deberá usarse la curva tipo que corresponda al caso que se desea analizar.

### 3.4

## CONSTANTES DE FORMACION EN ACUIFEROS SEMICONFINADOS EN REGIMEN VARIABLE

Los acuíferos semiconfinados (Figura No. 8) están cubiertos por acuitardos que en grandes extensiones contribuyen considerablemente a la alimentación de los acuíferos, los acuitardos pueden estar también recargados por zonas saturadas; algunas veces el agua del acuífero asciende a través de la capa semipermeable, lo que indica que, algunas veces el acuitardo se alimenta del acuífero principal ya sea en profundidad o lateralmente, la infiltración del agua hacia el acuífero y de éste hacia el acuitardo se llama "Filtración por goteo o rezume. Donde:

$$B = \sqrt{\frac{Kbb'}{K'}} \quad (30)$$

Donde:

B = Factor de rezume o factor de goteo

K = Coeficiente de permeabilidad del acuífero

K' = Coeficiente de permeabilidad del acuitardo

b = Espesor saturado del acuífero

b' = Espesor saturado del acuitardo

Un valor alto de B significa que tiene lugar un rezume pequeño y viceversa.

El valor de rezume se puede caracterizar mediante el siguiente coeficiente:

$$\frac{K'}{b'} = \text{Coeficiente de Rezume}$$

Ahora, para calcular el abatimiento en un acuífero semiconfinado, según Hantush y Jacob se hace mediante la siguiente expresión:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(U, r/B) \quad 31$$

Donde

Donde:

$$W(u, r/B) = \int_0^{\infty} \frac{1}{x} e^{-x - \frac{r^2}{4B^2x}} dx \quad \text{"Función de pozo para acuíferos semiconfinados"}$$

$u$ , es la misma ecuación No. 24

$$r/B = \frac{r}{\sqrt{T/(K'/b')}} \quad (32)$$

Donde:

$r/B$  = es el valor del argumento, que en la curva tipo representa la desviación precisamente por el goteo o rezume.

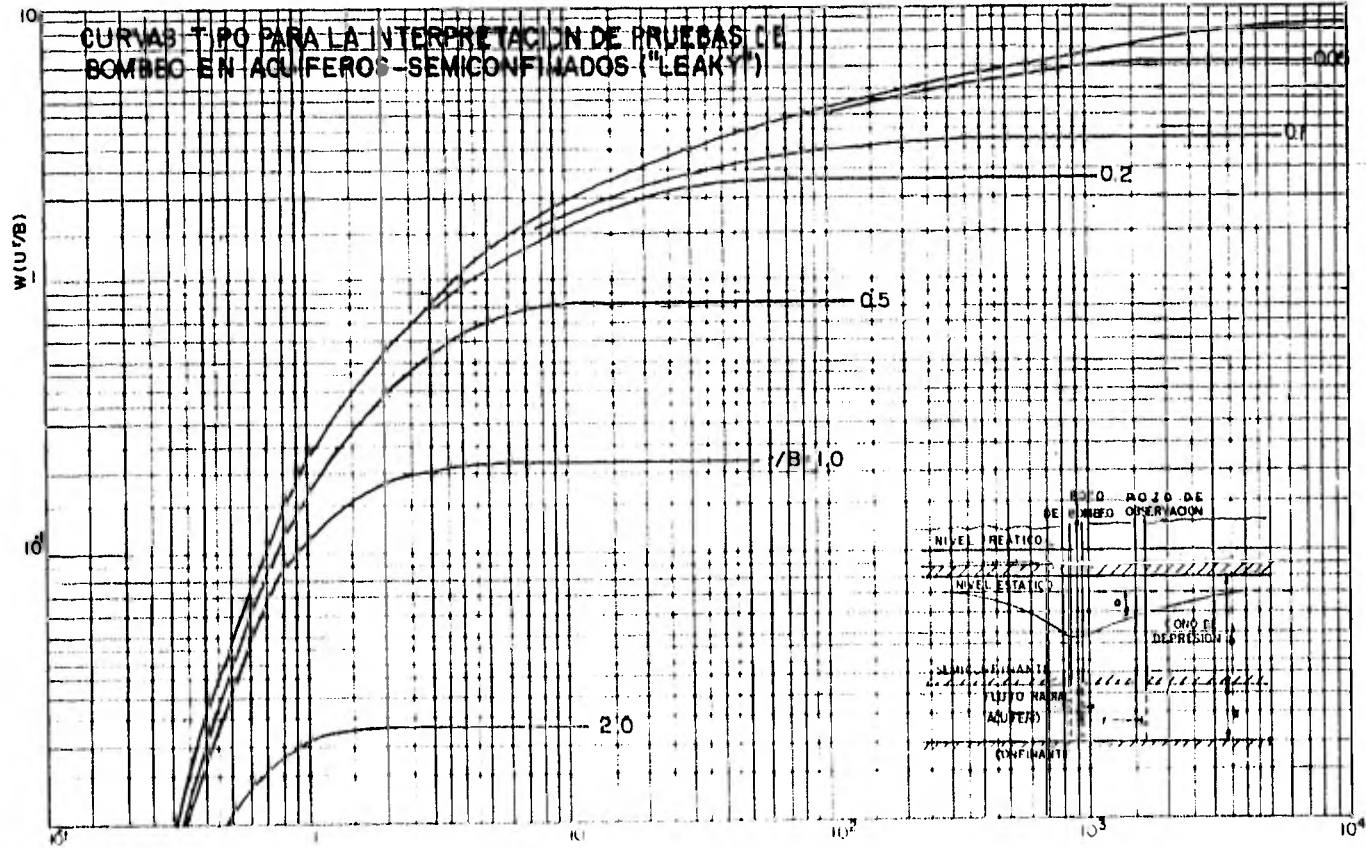
Para este caso, también se utiliza la curva tipo para determinar los parámetros del acuífero; para determinar la curva tipo se tabulan primeramente los valores de  $W(u, r/B) = 1/u$ , (Se anexa la curva tipo).

Hantush, sugirió los ecuaciones Núms.: 24, 31, 32 y 33 expuesta a continuación, para determinar los parámetros del acuífero:

$$K' = \frac{T b' C^2}{r} \quad (33)$$

La secuencia es la misma; se superpone la curva de campo con el conjunto de curvas tipo, manteniendo el paralelismo entre los respectivos ejes de coordenadas, de modo que la curva de campo se ajuste a la curva tipo correspondiente a un valor de  $r/B$  dado; el punto de ajuste es arbitrario y sus coordenadas son  $W(u, r/B)$ ,  $1/u$ ,  $a$  y  $t$  que juntamente con el valor de  $r/B$  de la curva tipo, se sustituyen en las ecuaciones 24, 31 y 32 y se obtienen los parámetros  $T$  y  $S$ , coeficientes de transmisividad y almacenamiento respectivamente.

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



### 3.5 ACUIFERO LIBRE

Cuando el flujo del agua posee una superficie libre, se dice que es un acuífero libre (Figura No. 9).

En este caso si consideramos a H como el espesor del acuífero, a el abatimiento, y si  $\frac{a}{H} < 0.02$ , entonces:

$$a = \frac{Q}{4\pi KH} W(U) \quad (34)$$

y si  $\frac{a}{H} > 0.02$  entonces:

$$a - \frac{a^2}{2H} = \frac{Q}{4\pi KH} W(U) \quad (35)$$

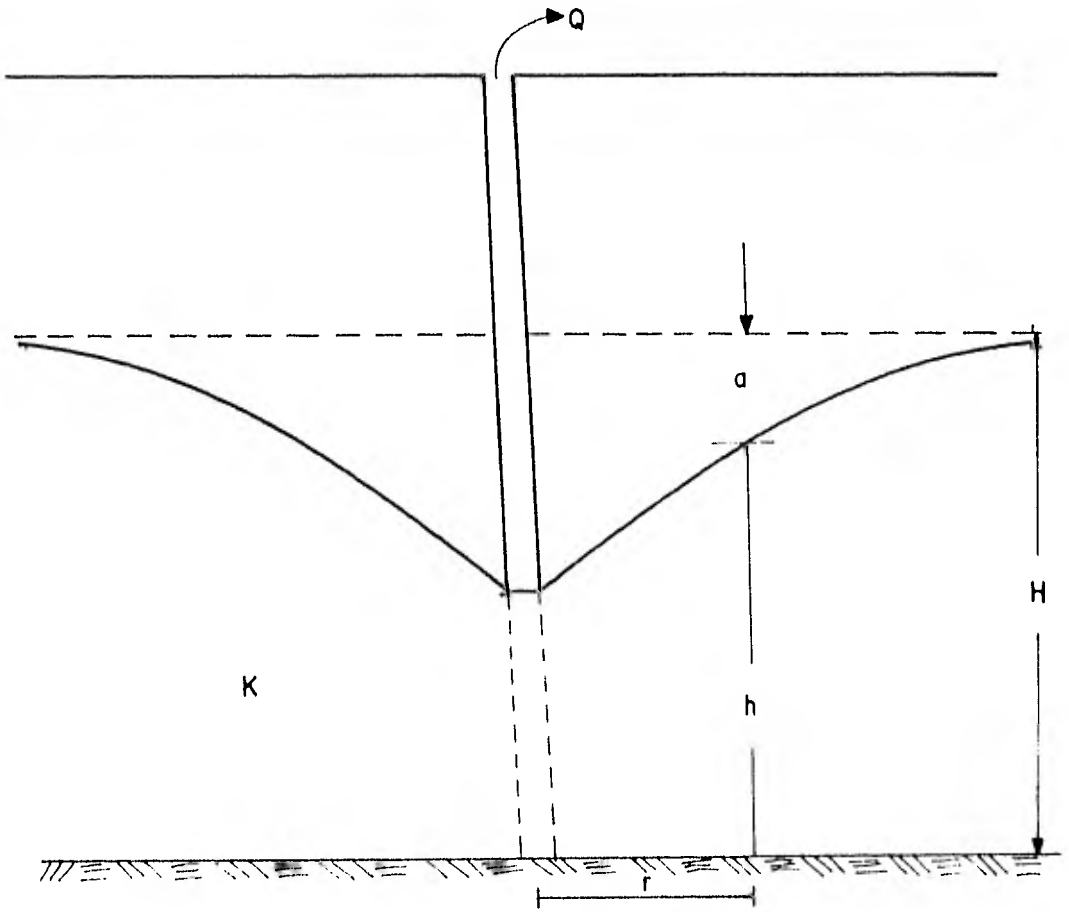
Utilizando las hipótesis de Dupuit la componente vertical del flujo se desprecia si  $r > 1.5 H$

### 3.6 PENETRACION PARCIAL

La penetración parcial de los pozos de bombeo en los acuíferos, producen deformaciones en la red de flujo, que se traduce en la disminución de la eficiencia del bombeo. Las experiencias nos dicen que relacionando el caudal Q, el abatimiento a, la longitud de penetración  $\lambda$  con el espesor del acuífero b, nos permiten apreciar como para un mismo caudal se incrementa el abatimiento a medida que la relación  $\lambda/b$  disminuye, de aquí la conveniencia de hacer un análisis económico, en el que se compare el costo de inversión inicial por mayor profundidad del pozo contra el costo de operación por consumo de energía para compensar el incremento de abatimiento.

### 3.7 COMENTARIOS ACERCA DE LAS INTERPRETACIONES DE BOMBEO

Como ya se dijo, existen diferentes sistemas de flujo, que en sus respuestas de niveles piezométricos del acuífero pueden ser semejantes; ésto quiere decir que, para definir el sistema de flujo del cual se trate, no únicamente se define de la curva tipo seleccionada según se ajuste con la curva de campo, sino que además se necesita información acerca de los cortes geológicos, registros eléctricos, características constructivas del pozo de bombeo y de los de observación, localización de afloramientos, ríos, canales, pozos en operación cercanos que pueden influir, etc. Además, los tiempos de bombeo influyen de manera muy significativa, ya que en tiempos cortos diferentes sistemas de flujo pre



F I G. N° 9.- Esquema de acuífero libre

sentan el mismo comportamiento en los niveles piezométricos y solo se pueden diferenciar después de cierto tiempo de bombeo, de esto se deriva que se recomienda realizar pruebas de bombeo lo suficientemente largas (uno o más días), como para que se identifique su comportamiento real.

Cuando se construyen pozos de observación y de bombeo, se tiene seguridad de que si están captando al mismo acuífero, pero cuando se seleccionan pozos ya existentes, debe tenerse más cuidado, ya que sus profundidades pueden ser diferentes al de bombeo; si el acuífero es más o menos homogéneo e isótropo, si todos los pozos de la prueba lo captan y si el flujo antes de la prueba es sensiblemente horizontal, entonces la diferencia de profundidades entre los pozos no afecta a la prueba, pero si el acuífero es anisótropo, si son varios acuíferos separados total o parcialmente por lentes de menor permeabilidad, o si el flujo no es predominantemente horizontal, entonces la diferencia de profundidades si afecta a la interpretación de la prueba o la hace no interpretable.

A veces no se cuenta con pozos de observación por muchas razones, esto obliga a observar el comportamiento del acuífero en el mismo pozo de bombeo, esto hace que la prueba sea dudosa, ya que en el pozo de bombeo llegan a efectuarse efectos adicionales que no se toman en cuenta en la mayoría de las teorías, como por ejemplo: pérdidas por entrada, fricción, cambios de dirección, flujo turbulento cerca del pozo, efectos del engravado, concentraciones de flujo, etc.







## CAPITULO IV

### APLICACION EN PRUEBAS DE BOMBEO REALES

Todo estudio de agua subterránea, requiere del conocimiento de los parámetros hidrodinámicos de los acuíferos, necesarios para poder explicar el comportamiento observado y predecir el comportamiento futuro bajo diferentes alternativas de explotación. Estos parámetros hidrodinámicos son el coeficiente de transmisibilidad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S), los cuales se obtienen mediante pruebas de bombeo en pozos convenientemente distribuidos que en forma general deberán contar con la siguiente información:

1.- Croquis esquemático de la zona comprendida en un radio de un kilómetro alrededor del pozo de bombeo, en el cual se indicarán la ubicación aproximada de ríos, lagunas, drenes, manantiales, pozos, etc.

2.- Conocimiento de las características constructivas de los pozos (profundidad, ubicación de cedazos, tramos engravados y cementados, etc.), cortes litológicos y eléctricos del pozo de bombeo y del/ o los de observación.

3.- Caudal de extracción y hora de inicio del bombeo, de los pozos próximos ( a distancias menores de un kilómetro del pozo con la prueba) que estén operando o inicien su operación en el transcurso de la prueba de bombeo.

#### 4.1 REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO

Estas se efectuarán en pozos convenientemente distribuidos, cercanos a los de observación y que cumplan con los siguientes requisitos:

- a) Deberán estar provistos de un equipo de bombeo en condiciones apropiadas para sostener un caudal de extracción constante durante el tiempo de duración de la prueba.
- b) Equipados de un medidor de volumen de extracción o que puedan ser aforados.
- c) El agua bombeada no se infiltre en las proximidades del pozo.
- d) Que no hayan sido bombeados durante las últimas 24 horas.
- e) Que se encuentren a una distancia no menor de un kilómetro, de pozos que sí estén bombeando durante la prueba, o hayan estado bombeando hasta 24 horas antes de la iniciación de la misma.
- f) Que se encuentren próximos a pozos que no hayan operado en las últimas 24 horas y que puedan ser fácilmente sondeados, para utilizarlos como pozos de observación.
- g) De características constructivas conocidas.

En relación a la duración de la prueba de bombeo, ésta constará de dos etapas, una de abatimiento y otra de recuperación. Tomando en cuenta la disponibilidad del equipo, la prueba de bombeo tendrá una duración variable (entre 4 y 96 horas) cuando haya pozos de observación y cuando no los haya, entre 4 y 24 horas, tendiendo a la duración máxima siempre que sea posible.

La prueba de bombeo podrá tener una sola etapa (la de abatimiento o la de recuperación), en caso de que no pueda disponerse del equipo de bombeo por un tiempo mayor o de que las condiciones existentes no sean favorables para ejecutar ambas etapas.

#### 4.2 EJECUCION DE LA PRUEBA DE BOMBEO

Antes de iniciar la prueba de bombeo, se revisará el equipo a utilizar (cronómetros, sondas, cintas métricas, escuadra para aforo, etc.), para verificar su

correcto funcionamiento, el cable de la sonda deberá ser previamente calibrada, se procurará que todas las observaciones en un pozo se efectúen con la misma sonda.

Se medirá la profundidad al N.E. (nivel estático) en el pozo de bombeo y en el, o los de observación antes de iniciar el bombeo, anotando la hora de iniciación, el nombre de los pozos, el diámetro  $\varnothing$  de descarga, etc., procurando mantener un caudal constante, se procederá a medir la profundidad al nivel del agua en el pozo de bombeo y en el, o los de observación, con la secuela de tiempos (no rigurosamente) que se indican a continuación:

<u>Lectura</u>	<u>Tiempo a partir de la iniciación del bombeo</u>
1	Inmediatamente antes de iniciar el bombeo
2	15 seg.
3	30 seg.
4	1 minuto
5	2 minutos
6	4 minutos
7	8 minutos
8	15 minutos
9	30 minutos
10	1 hora
11	2 horas
12	4 horas
13	8 horas
14	16 horas
15	24 horas
16	32 horas
17	40 horas
18	48 horas , etc.

Si por cualquier cosa, no puede detectarse el nivel dinámico en el tiempo señalado, se hará la medición y se indicará el tiempo real correspondiente.

A intervalos de tiempos seleccionados, se harán las observaciones o 28

lecturas necesarias para cuantificar el caudal de bombeo.

De acuerdo a las observaciones (lecturas del nivel dinámico del agua), se construirán los gráficos (de abatimiento - tiempo o de recuperación- tiempo); en la graficación podrá utilizarse papel con trazado aritmético o semilogarítmico (los tiempos en minutos, se llevarón en la escala logarítmica) o bien papel doble logarítmico; estas gráficas permiten juzgar el correcto desarrollo de las pruebas de bombeo detectar errores de medición, variaciones del caudal, las cuales constituyen un elemento de juicio para continuar o suspender una prueba.

La duración de la prueba de bombeo prefijada inicialmente, podrá modificarse con el criterio siguiente.

- 1.- Cuando el caudal de bombeo varíe apreciablemente en forma continua e incontrolable.
- 2.- Cuando en la gráfica del pozo bombeado se observe una estabilización del nivel dinámico por un tiempo mínimo de cuatro horas.

Una vez concluida la prueba de bombeo, se iniciará la etapa de recuperación en la que se harán observaciones en la misma secuela de tiempos descrita anteriormente (no necesariamente) para la etapa de abatimientos, con la diferencia de que ésta se iniciará a partir de la suspensión del bombeo.

La etapa de recuperación podrá suspenderse antes de la duración fijado, cuando se observe la restabilización del nivel estático del agua.

#### 4.3 INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO LOCALIZADAS EN EL VALLE DEL YAQUI, SONORA.

LOCALIZACION.- El Valle del Yaqui, Son., está localizado en la cuenca del río Yaqui, el clima de la región es desértico, con vegetación xerofita y lluvias en el verano; sobre el río Yaqui está construida la Presa Alvaro Obregón, de la que salen tres canales, uno de ellos da servicio a las colonias yaquis y los otros dos (canales alto y bajo), proporcionan agua para riego a dicho Valle (Fig. No. 10).

Además del río Yaqui existe un cierto número de pequeños arroyos de tipo torrential, de los cuales el único de importancia es el Cocoraque, el cual des-

# CROQUIS DE LOCALIZACION

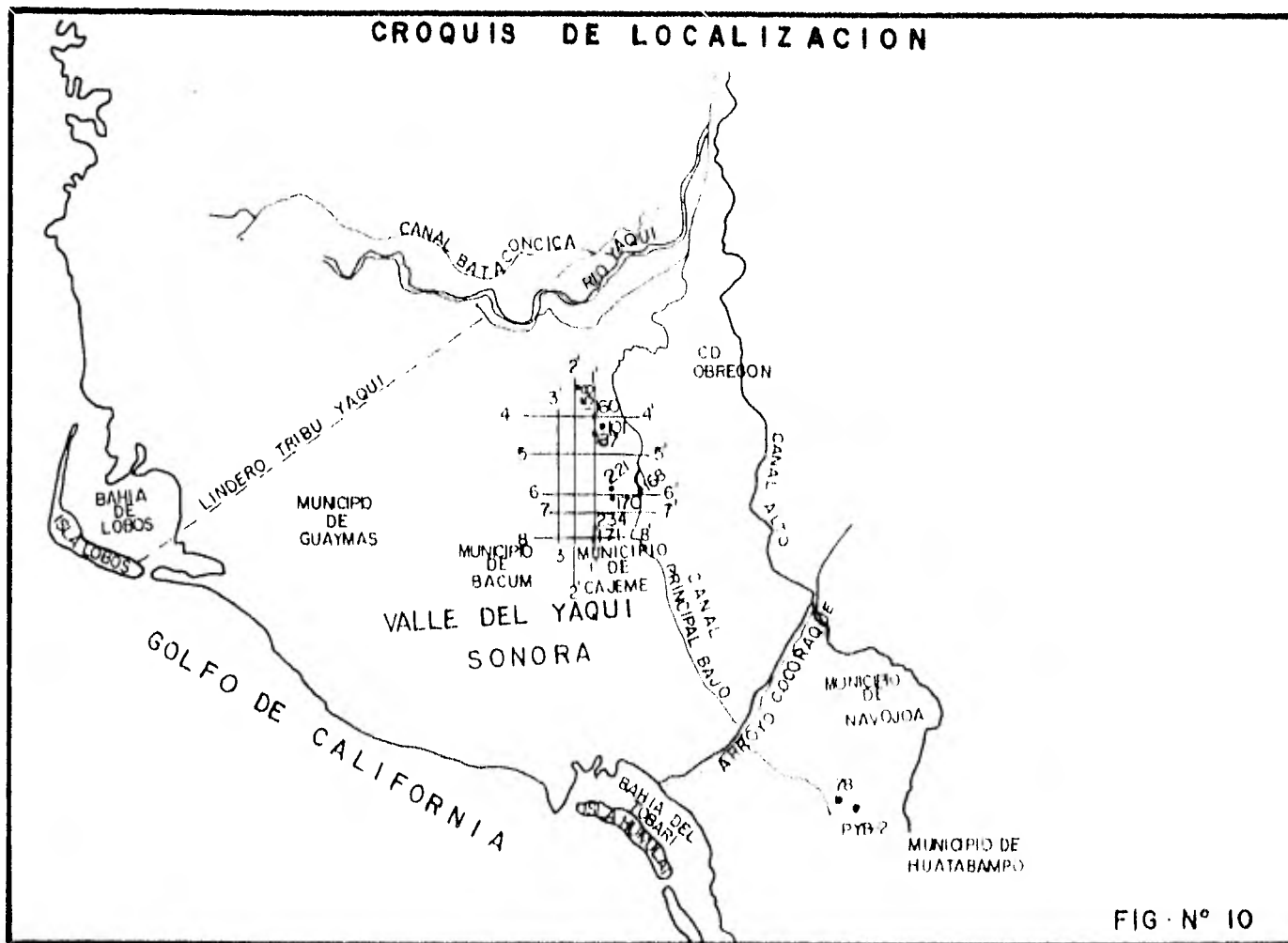


FIG · N° 10

ZONA VALLE DEL YAQUILSONORA

LUGAR DISTRITO DE RIEGO N° 41

POZO N° 158 PROF. 83 mts

CEDAZO (S) DE 1.0 A 8.0 mts

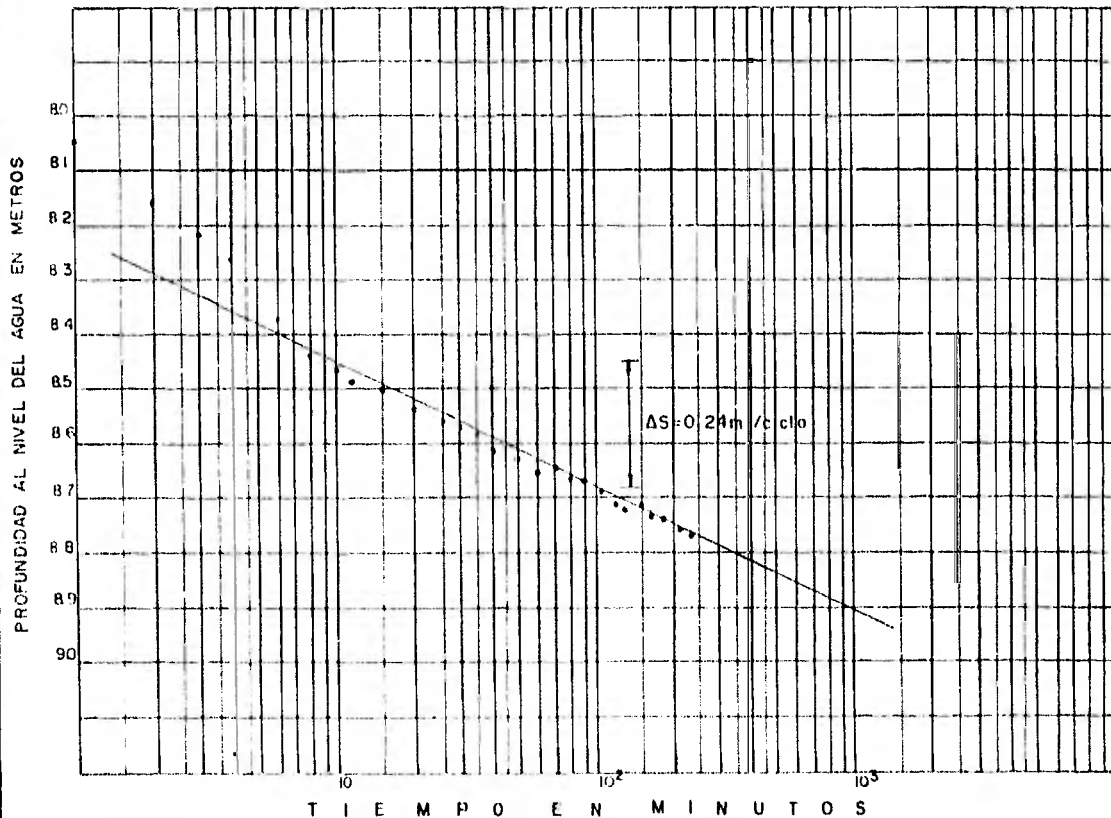
Ø DESC. 10" cm CAUDAL 7.8 lps

PROF. N. E. 5.67 mts. CUADRO

FECHA 18/XII/68 DURACION 4 hrs

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUAFEM
0	5.67
1	8.05
2	8.15
3	8.21
4	8.26
6	8.38
8	8.44
10	8.47
12	8.49
15	8.50
20	8.54
25	8.56
30	8.57
35	8.59
40	8.61
50	8.62
60	8.65
70	8.64
80	8.66
90	8.67
105	8.69
120	8.71
135	8.72
150	8.71
165	8.73
180	8.74
210	8.76
240	8.77

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO



ETAPA DE

OBSERVACIONES Pozo de bombeo #158 sin codo de observación

1.0810

1.0131(0.978) 0.01427 0.05945  
0.24 0.24

1.5945 x 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/seg

FIG N° 13

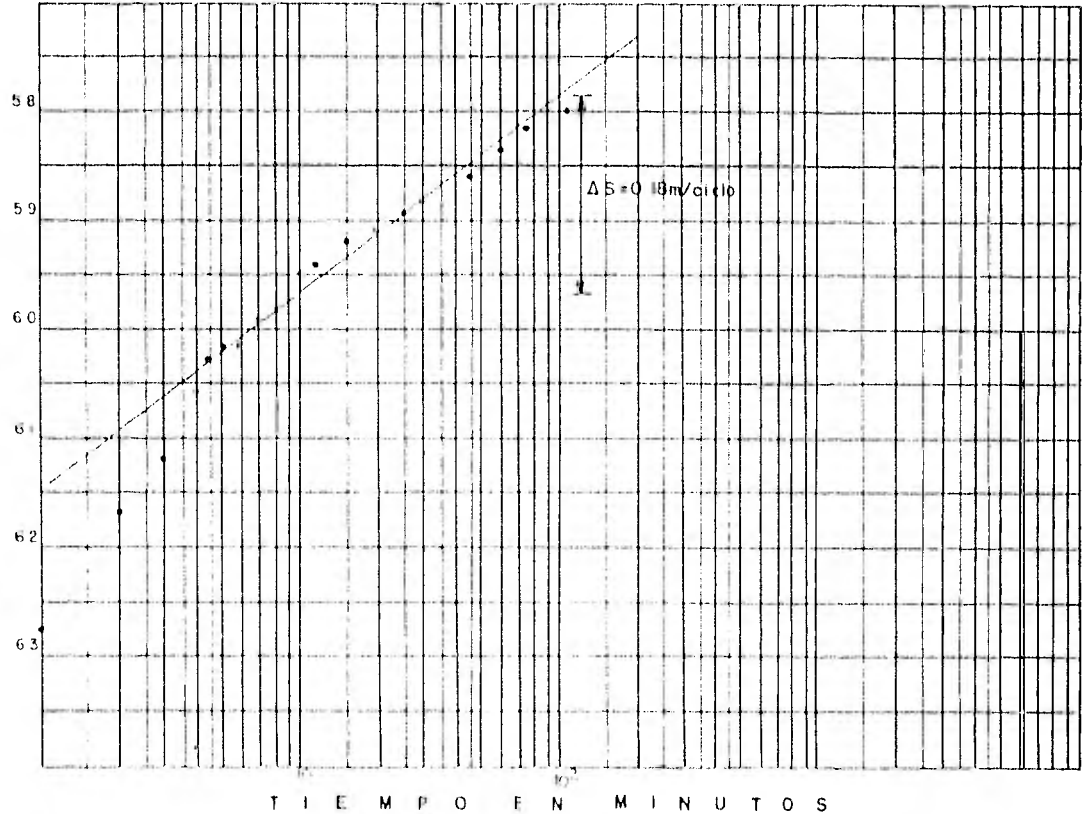
U. N. A. M.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE  
PRUEBAS DE BOMBEO  
ETAPA DE ABATIMIENTO  
TESIS PROFESIONAL  
GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ

ZONA VALLE DEL YAQUI SONORA  
 LUGAR DISTRITO DE RIEGO N.º 4  
 POZO N.º 15B PROF. 8.00 m/s  
 CEDAZO (S) DE 10 m A 9.0 m/s  
 Ø DESC. 10" cm CAUDAL 78 lps  
 PROF N.º 5.67 m/s CUADRO  
 FECHA 18/XII/68 DURACION 145 hrs

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN M
0	5.67
1	6.28
2	6.17
3	6.12
4	6.06
5	6.02
6	6.02
7	5.99
8	5.98
10	5.95
12	5.94
15	5.92
20	5.91
25	5.89
30	5.88
45	5.86
60	5.84
75	5.82
105	5.80

PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS



ETAPA DE

$T = 0.1832$   
m

OBSERVACIONES pozo de bombeo N.º 15B sin pozo de observacion

$T = 0.18320 - 0.18310, 0.780$   
 $\Delta S = 0.18$   $U = 0.793 \cdot 1 = 793 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$

FIG N.º 14

U. N. A. M.  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO  
 ETAPA DE RECUPERACION  
 TESIS PROFESIONAL  
 GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ



ZONA: VALLE DEL YAQUI SONORA

LUGAR: DISTRITO DE RIEGO N° 41

POZO N° 160 PROF. 7.0 mts

CEDAZO (S) DE 28 m A 70 mts

Ø DESC. 1.0" cm. CAUDAL 1.29 lps

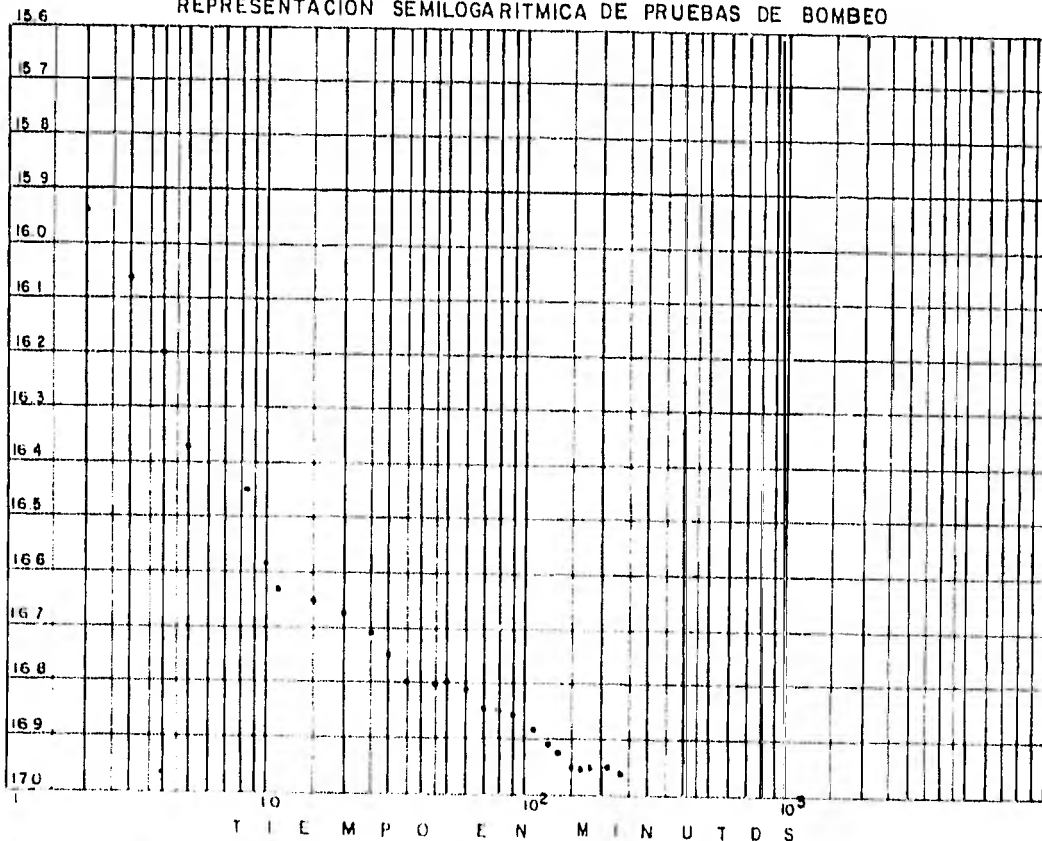
PROF. N. E. 4.06 mts. CUADRO

FECHA: 5/XI/68 DURACION 4 hrs

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN M	
0	4.06	
1	15.66	
2	15.94	
3	16.07	
4	16.20	
5 15	16.38	
8 20	16.45	
10	16.59	
12	16.63	
15	16.65	
20	16.68	
25	16.71	
30	16.75	
35	16.80	
45	16.80	
50	16.80	
60	16.81	
70	16.85	
80	16.85	
90	16.86	
105	16.89	
120	16.92	
135	16.94	
150	16.97	
165	16.97	
180	16.97	
210	16.97	
240	16.97	

PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS

### REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO



ETAPA DE

OBSERVACIONES: Pozo de Bombeo N°160 sin pozo de observación (no interpretable)

T 0183 Q

T 0183 X

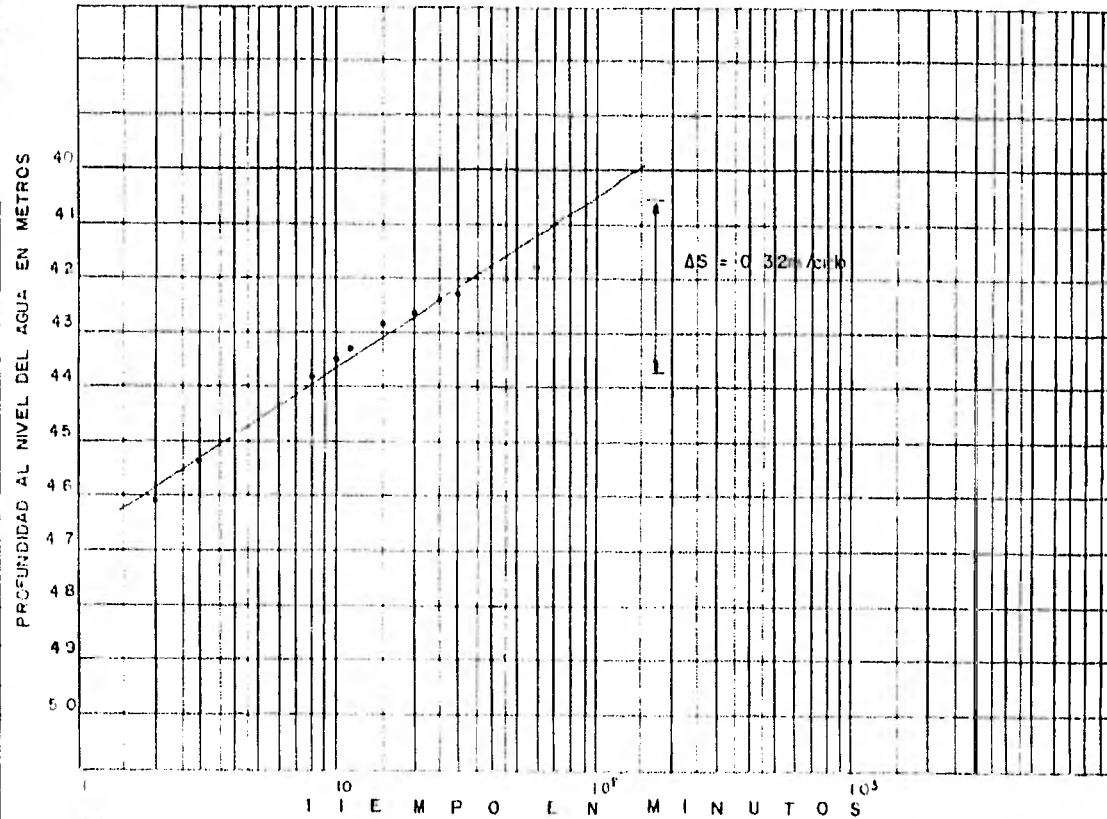
FIG N° 15

U. N. A. M.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO  
ETAPA DE ABATIMIENTO  
TESIS PROFESIONAL  
GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ

ZONA VALLE DEL YAQUI SONORA  
 LUGAR: DISTRITO DE RIEGO N° 41  
 POZO N° 160 PROF 70 mts  
 CEDAZO (S) DE 28 m A 70 mts  
 Ø DESC 10 cm CAUDAL 129 lps  
 PROF NE 4.06 mts CUADRO  
 FECHA 5/XII/68 DURACION 1 hrs

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN M
1	4.76
2	4.61
3	4.54
4	4.48
6	4.43
8	4.38
10	4.35
12	4.33
15	4.29
20	4.26
25	4.24
30	4.23
45	4.20
60	4.18

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO



ETAPA DE

TUBO

OBSEVACION: Pozo de bombeo N° 160 sin pozo de observacion

T 0.103 > 2.0 0.510.1221 - 0.07377 - T = 7377 X 10<sup>-3.2</sup> / seg

FIG N° 16

U. N. A. M.  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO  
 ETAPA DE RECUPERACION  
 TESIS PROFESIONAL  
 GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ

ZONA VALLE DEL YAQUI SONORA

LUGAR DISTRITO DE RIEGO N° 41

POZO N° 168 PROF 130 mts.

CEDAZO (S) DE 34 m A 42 m

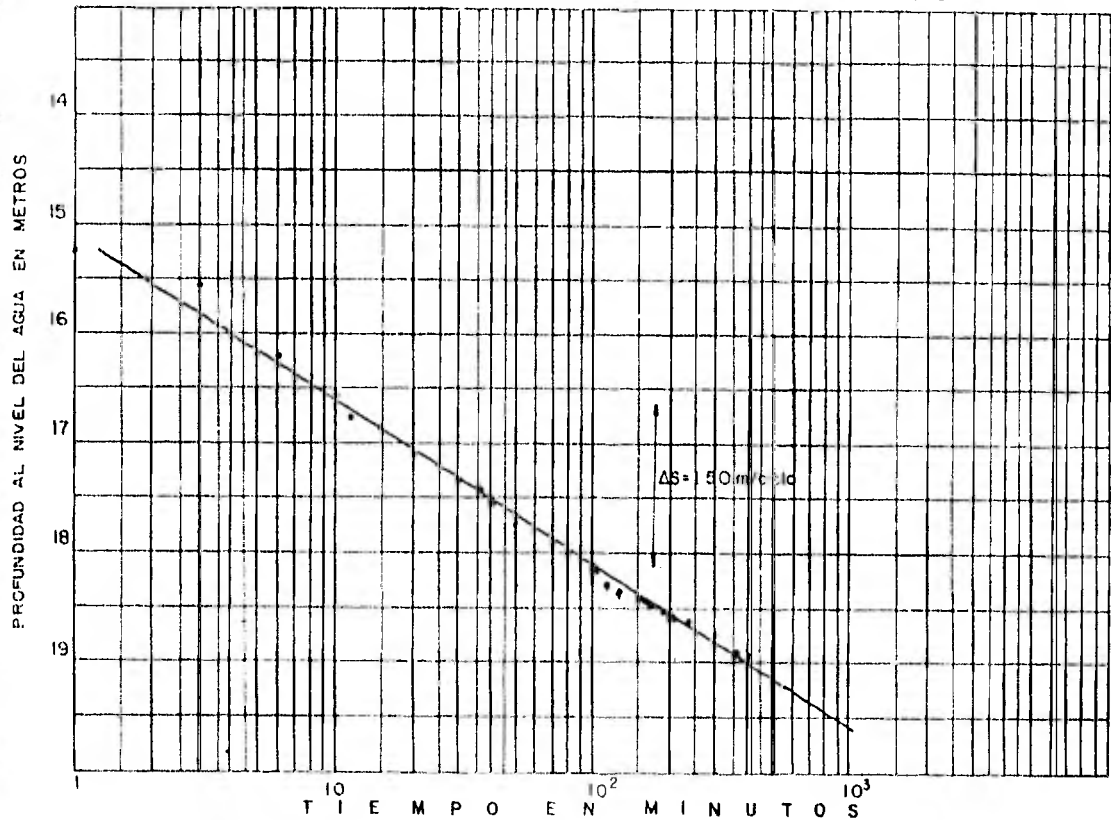
Ø DESC 10 cm CAUDAL 51.6 lps

PROF. N E 7.40 mts. CUADRO

FECHA 1/XII/68 DURACION 7 hrs

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN M
0	7.40
1	15.25
5	15.58
4	16.02
6	16.24
8	16.44
10	16.59
12	16.76
15	16.84
20	17.05
25	17.21
30	17.30
37	17.48
40	17.52
50	17.75
60	17.83
70	17.89
80	17.97
90	18.05
105	18.19
120	18.26
135	18.31
150	18.39
165	18.46
180	18.51
210	18.57
240	18.69
300	18.76
360	18.90
420	18.99

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO



ETAPA DE

$T = 0.183 Q$   
m

OBSERVACIONES Pozo de bombeo N° 168 en pozo de observacion

$T = 0.183 Q \cdot 0.165 (0.0516) = T = 0.006295$

$T = 6.295 \times 10^{-4} \text{ min}$

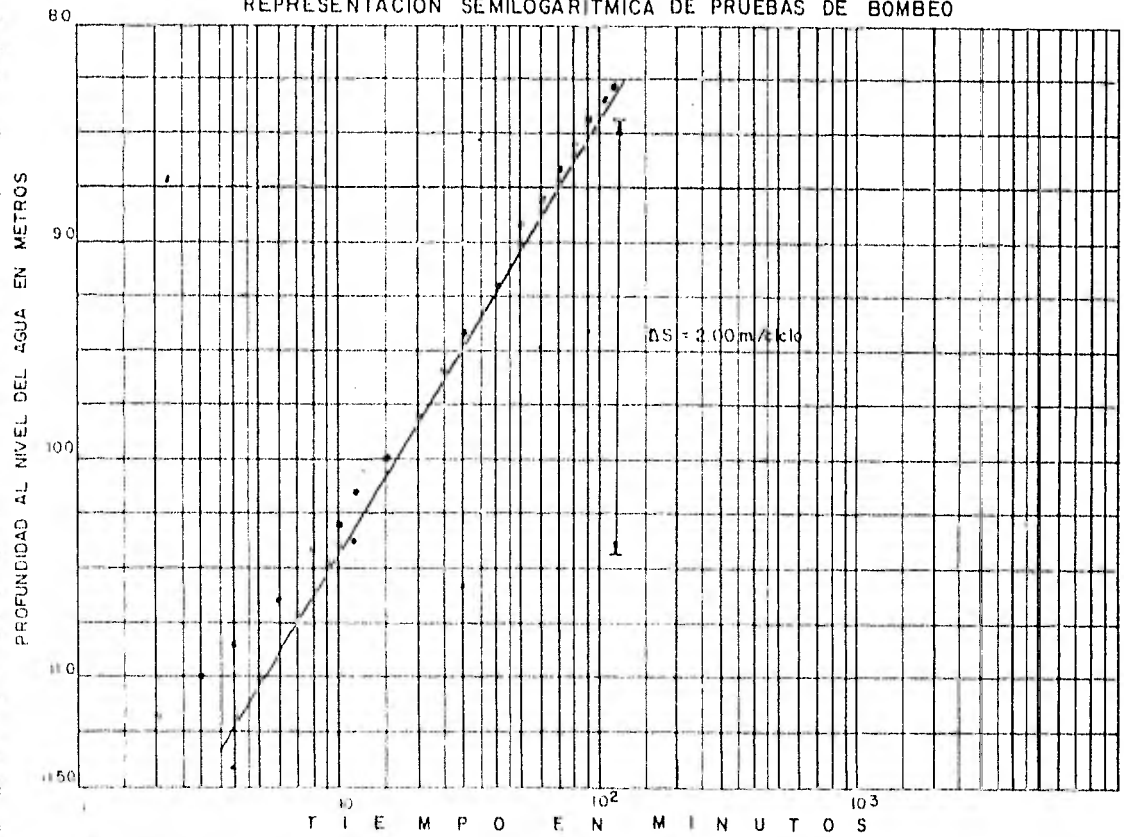
FIG. N° 17

U. N. A. M.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE  
PRUEBAS DE BOMBEO  
ETAPA DE ABATIMIENTO  
TESIS PROFESIONAL  
GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ

ZONA VALLE DEL YAQUI SONORA  
 LUGAR DISTRITO DE RIEGO N.º 41  
 POZO N.º 168 PROF. 130 mts  
 CEDAZO (S) DE 60 m A 33 mts  
 Ø DESC 10 cm CAUDAL 51.6 lps  
 PROF. N. E. 18 99 mts CUADRO  
 FECHA 10/XII/69 DURACION 2 hrs

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN M
0	18.99
1	11.26
2	11.21
3	11.00
4	10.86
6	10.63
8	10.45
10	10.29
12	10.15
15	10.00
20	9.79
25	9.62
30	9.44
40	9.20
50	8.94
60	8.80
70	8.65
80	8.56
90	8.47
105	8.36
120	8.28

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO



ETAPA DE

OBSERVACIONES POZO DE BOMBEO N.º 168 SIN  
 POZO DE OBSERVACION  
 $T = 0.1830 \text{ m}$   
 $T = 0.1830(0.0516) + 0.1830(0.0516) = 0.472 = T = 0.472 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$

FIG N.º 18

U. N. A. M.  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE  
 PRUEBAS DE BOMBEO  
 ETAPA DE RECUPERACION  
 TESIS PROFESIONAL  
 GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ

ZONA VALLE DEL YAQUI SENORA

LUGAR DISTRITO DE RIFCO Nº 41

POZO Nº 101993-1) PROF 110 mts

CEDAZO (S) DE 25 A 38 mts

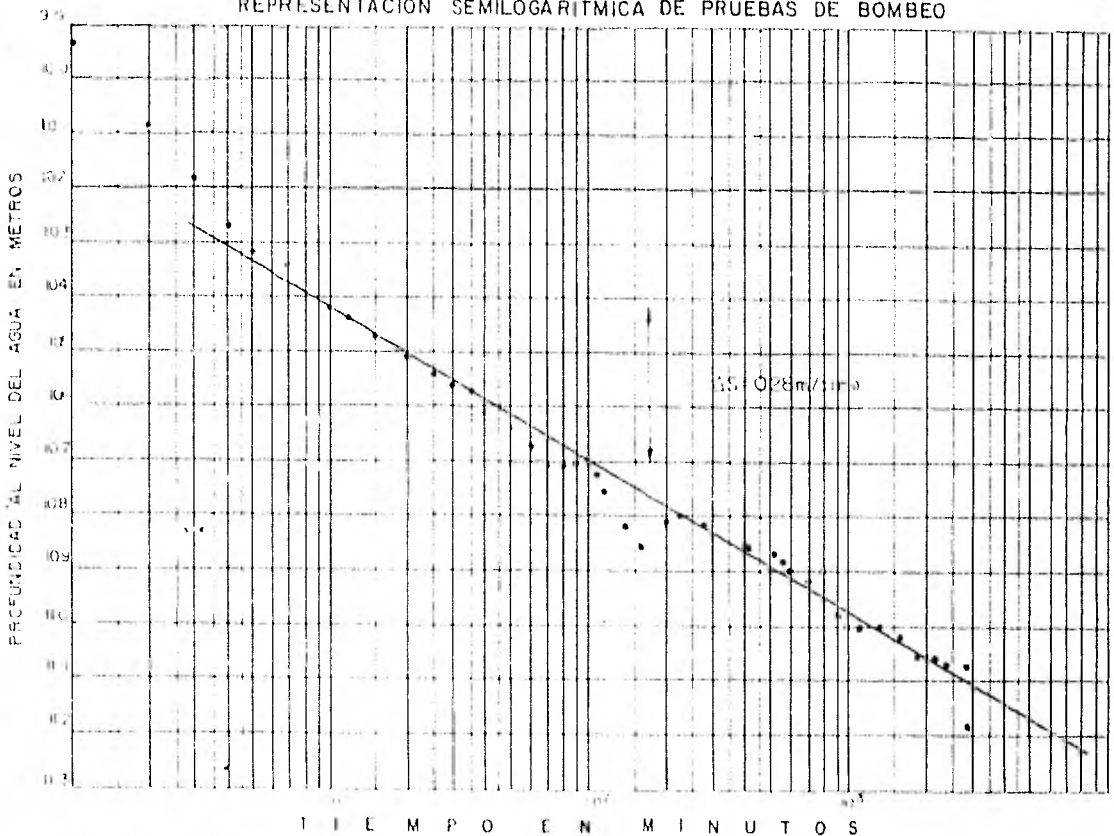
Ø DESC 10 cm CAJAL 140 lps

PROF N E. 4.92 mts CUADRO

FECHA 20/12/88 DURACION 4.8 hrs

TIEMPO NUMERADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS
0	109.6	0.00	109.6
1	109.5	1.00	109.5
2	109.4	2.00	109.4
3	109.3	3.00	109.3
4	109.2	4.00	109.2
5	109.1	5.00	109.1
7	108.9	7.00	108.9
10	108.7	10.00	108.7
15	108.5	15.00	108.5
20	108.3	20.00	108.3
25	108.1	25.00	108.1
30	107.9	30.00	107.9
35	107.7	35.00	107.7
40	107.5	40.00	107.5
45	107.3	45.00	107.3
50	107.1	50.00	107.1
55	106.9	55.00	106.9
60	106.7	60.00	106.7
65	106.5	65.00	106.5
70	106.3	70.00	106.3
75	106.1	75.00	106.1
80	105.9	80.00	105.9
85	105.7	85.00	105.7
90	105.5	90.00	105.5
95	105.3	95.00	105.3
100	105.1	100.00	105.1
105	104.9	105.00	104.9
110	104.7	110.00	104.7
115	104.5	115.00	104.5
120	104.3	120.00	104.3
125	104.1	125.00	104.1
130	103.9	130.00	103.9
135	103.7	135.00	103.7
140	103.5	140.00	103.5
145	103.3	145.00	103.3
150	103.1	150.00	103.1

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO



ETAPA DE

CEBIL ABORES. Pozo de bombeo Nº 170 con pozo de observación Nº 271 a 500 m de distancia

1.0832 m  
1.0821

FIG Nº 19

U. N. A. M.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO  
ETAPA DE ABATIMIENTO  
TESIS PROFESIONAL  
GAUDENCIO VALDEMAR CABREHA PEREZ

ZONA VALLE DEL YAQUI SONORA

LUGAR DISTR TO DE RIEGO N° 41

POZO N° 1701902-1 PROF 150 mts

CEDAZO (S) DE 55 A 138 mts

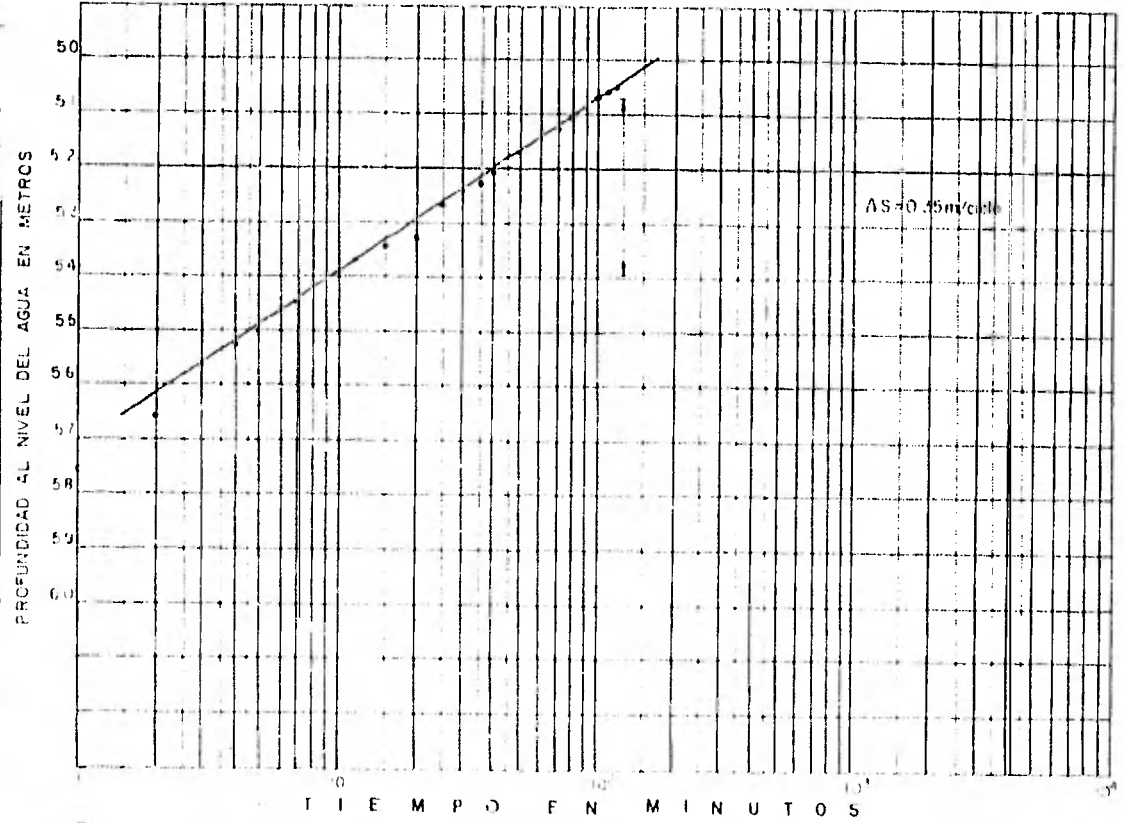
Ø DESC 10" cm CAUDAL 140 lps

PROF N E 494 mts CUADRO

FECHA 27/X/69 DURACION 2 hrs

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL EN LA TUBERIA EN METROS
0	11.19
1	5.76
2	5.605
3	5.56
4	5.52
5	5.50
7	5.45
10	5.405
12	5.375
15	5.343
20	5.303
25	5.273
30	5.241
35	5.221
40	5.201
50	5.170
60	5.142
70	5.121
80	5.107
90	5.090
100	5.076
110	5.065
120	5.057

### REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO



ETAPA DE

GENERALES Pozo de Control N° 170 en el pozo de observación N° 270 a 100 m de distancia

U. N. A. M. 116 N° 20

U. N. A. M.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE  
PRUEBAS DE BOMBEO  
ETAPA DE RECUPERACION  
TESIS PROFESIONAL  
GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ

ZONA VALLE DEL YAQUI SONORA

LUGAR DISTRITO DE RIEGO N° 41

POZO N° 221 PROF 150 mls

CEDAZO (S) DI 40m A 146 mls

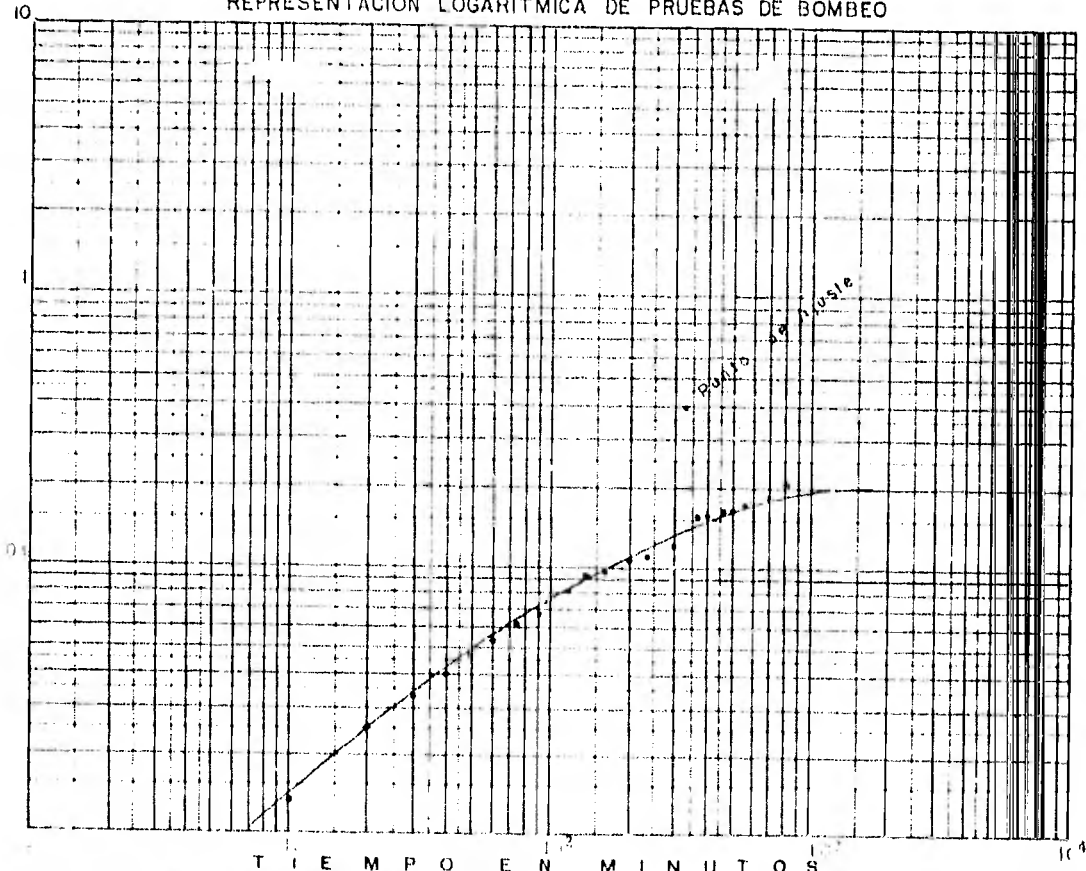
Ø DESC 10 cm CAUDAL lps

PROF N E. 3.83 mls CUADRO

FECHA 30/IX/69 DURACION 48 hrs

REPRESENTACION LOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	ABATIMIENTO EN METROS	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	ABATIMIENTO EN METROS
0'	3.83	2 900'	0.206
10'	0.013		
20'	0.025		
30'	0.034		
40'	0.040		
50'	0.047		
60'	0.053		
75'	0.061		
90'	0.069		
100'	0.074		
120'	0.081		
140'	0.091		
160'	0.099		
200'	0.114		
240'	0.129		
300'	0.138		
360'	0.155		
400'	0.157		
460'	0.165		
500'	0.168		
560'	0.178		
680'	0.179		
700'	0.193		
800'	0.204		
900'	0.211		
1000'	0.211		
1400'	0.231		
1600'	0.235		
1800'	0.235		
2000'	0.261		
2200'	0.271		
2400'	0.281		
2800'	0.281		



r/B=1  
W(u, r/B)=1  
1/u = 10, u = 0.1  
a=0.32  
l=1200' = 72,000"

$$T = \frac{Q}{4\pi a} W(u, r/B) = \frac{4(2.67)(0.5)}{4(0.0243)} \cdot 0.140 = 1.4432 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{ seg}$$

$$S = \frac{4TlU}{r^2} = \frac{4(1.4432)(72000)(0.1)}{500^2} = \frac{84072}{250000} = 0.00416 = 4.16 \times 10^{-4}$$

OBSERVACIONES: Pz de observación 120m de su pzo de bombeo (21.1)

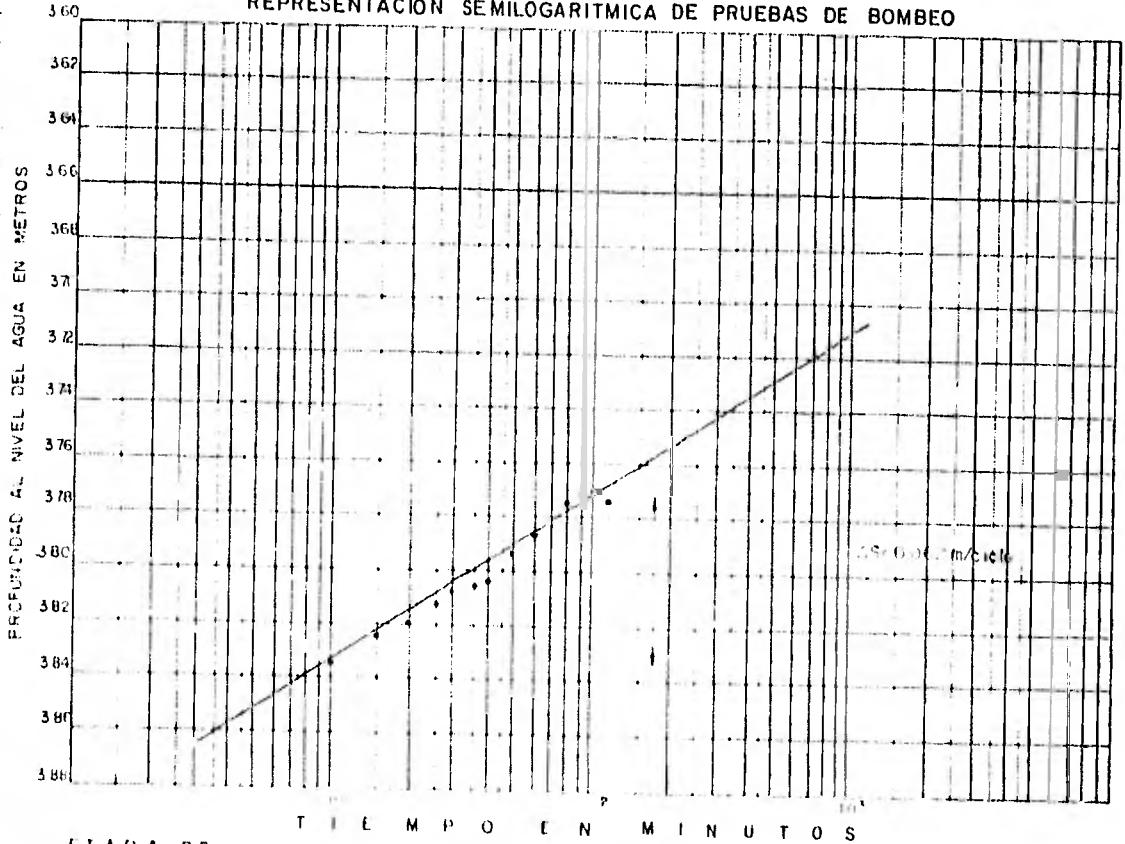
FIG N° 21

U. N. A. M.
FACULTAD DE INGENIERIA
REPRESENTACION LOGARITMICA
PRUEBAS DE BOMBEO
ETAPA DE ABATIMIENTO
TESIS PROFESIONAL
J. R. B. VALDEMAR GARRERA PEREZ

ZONA VALLE DEL YAQUI SONORA  
 LUGAR DISTRITO DE RIFGO N°41  
 POZO N° 221(01-10) PROF 150 mts  
 CEDAZO (S) DE 40 A 146 mts  
 Ø DESC 10 cm CAUDAL \_\_\_\_\_ lps  
 PROF. N. E. 3.83 mts CUADRO \_\_\_\_\_  
 FECHA 27/1/69 DURACION 2 hrs

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROXIMIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN M
10'	3.834
15'	3.824
20'	3.820
25'	3.813
30'	3.809
35'	3.806
40'	3.805
50'	3.795
60'	3.787
70'	3.783
80'	3.777
90'	3.772
100'	3.770
120'	3.776

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO



ETAPA DE

OBSERVACIONES: Pozo de observación N° 221 del pozo de bombeo N° 170

FIG N° 22

**U. N. A. M.**  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO  
 ETAPA DE RECUPERACION  
 TESIS PROFESIONAL  
 GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ

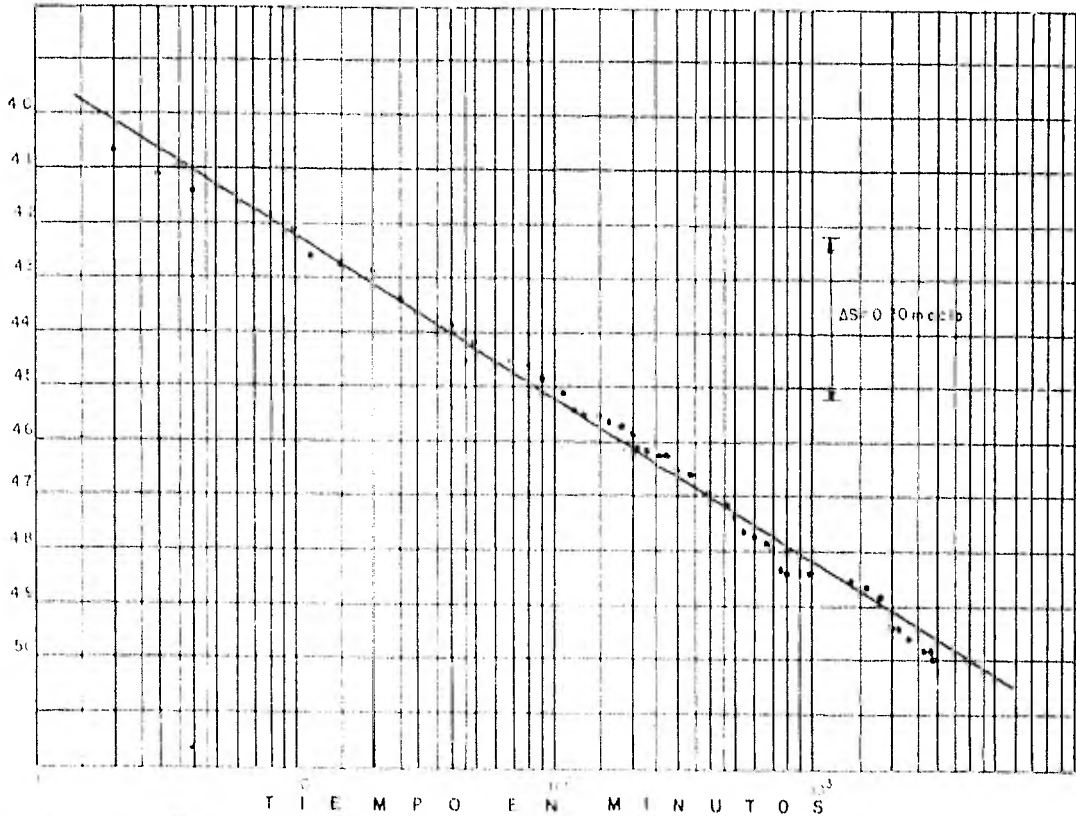


ZONA VALLE DEL YAQUI SONORA  
 LUGAR DISTRITO DE RIEGO N° 41  
 POZO N° 17 (LQI-1) PROF 120 mts  
 CEDAZO (S) DE  $\frac{46}{76}$  A  $\frac{56}{116}$  mts  
 Ø DESC 10 cm. CAUDAL 1.40 lps  
 PROF N E. 2.01 mts. CUADRO  
 FECHA 23/IX/69 DURACION 48 hrs

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS
0	2.01	3.40	4.75
1	4.03	4.10	4.80
2	4.07	4.11	4.85
3	4.11	5.33	4.90
4	4.14	5.40	4.95
6	4.17	6.00	4.98
8	4.19	6.60	4.99
10	4.21	7.00	4.99
12	4.26	7.00	4.99
15	4.28	8.00	4.99
20	4.29	9.00	4.99
25	4.33	10.00	4.99
30	4.36	11.00	4.99
35	4.38	12.00	4.99
40	4.39	13.00	4.99
45	4.40	14.00	4.99
50	4.42	15.00	4.99
60	4.45	16.00	4.99
70	4.45	17.00	4.99
80	4.46	18.00	4.99
90	4.49	19.00	4.99
105	4.52		
120	4.54		
135	4.55		
150	4.55		
165	4.57		
180	4.58		
200	4.59		
220	4.61		
240	4.62		
260	4.62		
280	4.63		
300	4.65		

PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN METROS



ETAPA DE

OBSERVACIONES Pozo de bombeo N° 171 con pozos de observación N° 234 a 100.00 m de distancia

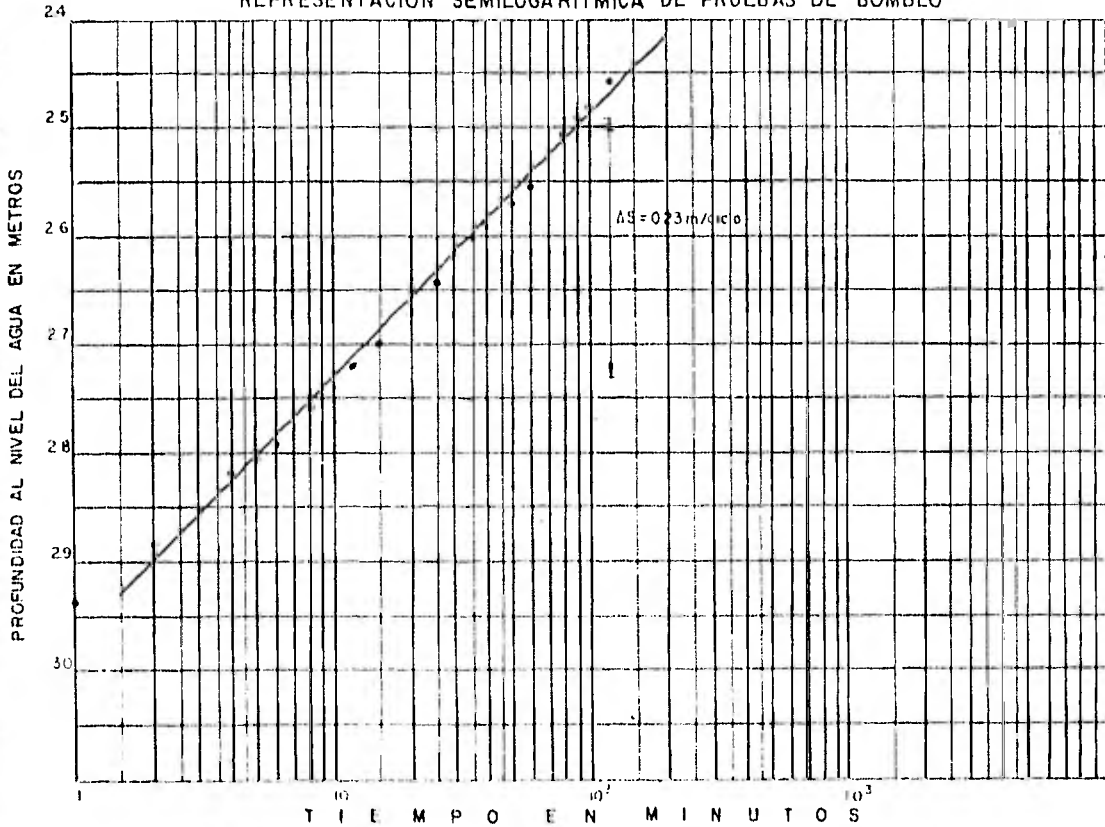
FECHA 23/IX/69 HORA 10:00 AM  
 OBSERVADOR G. VALDEMAR CABRERA PEREZ

FIG N° 23  
 U. N. A. M.  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO  
 ETAPA DE ABATIMIENTO  
 TESIS PROFESIONAL  
 GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ

ZONA VALLE DEL YAQUI SONORA  
 LUGAR DISTRITO DE RIEGO N° 41  
 POZO N° 17 (R01-1) PROF. 1.20 mts  
 CEDAZO (S) DE 46 A 116 mts  
 Ø DESC. 1.0 cm. CAUDAL 1.40 lps.  
 PROF. N.E. 2.01 mts. CUADRO  
 FECHA 25/IX/69 DURACION 2 hrs.

TIEMPO AJUSTADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN M
1	5.00
2	2.930
3	2.880
4	2.855
5	2.825
6	2.805
8	2.790
9	2.760
10	2.740
12	2.720
15	2.700
20	2.670
25	2.640
30	2.620
35	2.600
40	2.590
50	2.570
60	2.555
70	2.530
80	2.505
90	2.490
100	2.480
120	2.460

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO



ETAPA DE

$T = 0.183 \frac{(10 \cdot 140)}{0.23} \text{ O IIIA T = III 4X10 }^3 \text{ m}^2 \text{ seg}$

OBSERVACIONES Pozo de bombeo N° 71 con pozo de observación N° 234 a 1000m de distancia

$T = 0.183 X$

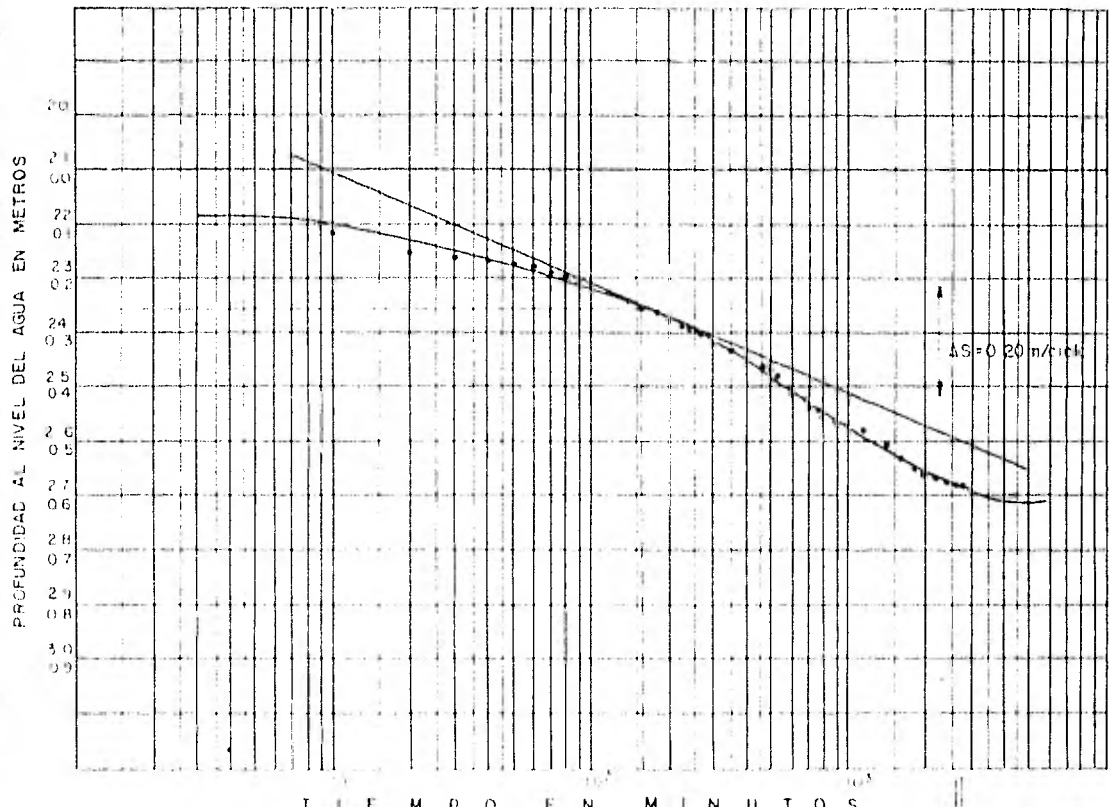
FIG N° 24

U. N. A. M.  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE  
 PRUEBAS DE BOMBEO  
 ETAPA DE RECUPERACION  
 TESIS PROFESIONAL  
 GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ

ZONA VALLI DEL YAGUI SONORA  
 LUGAR DISTRITO DE RIEGO N° 4 I  
 POZO N° 234 (003-3) PROF 110 mts  
 CEDAZO (S) DE 60 A 142 mts  
 Ø DESC 10" cm CAUDAL 1 lps  
 PROF N E 2 170 mts CUADRO  
 FECHA 23/1 X 1969 DURACION 18 hrs

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN M	TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA EN M
0	2 170	1 200	2 584
10	2 220	1 400	2 618
20	2 250	1 600	2 639
30	2 260	1 800	2 650
40	2 265	2 000	2 663
50	2 260	2 200	2 671
60	2 266	2 400	2 680
70	2 290	2 600	2 683
80	2 300	2 800	2 685
90	2 306	2 900	2 686
100	2 309		
120	2 334		
140	2 343		
160	2 360		
180	2 368		
200	2 371		
220	2 390		
240	2 395		
260	2 409		
280	2 414		
300	2 421		
340	2 431		
400	2 451		
460	2 468		
500	2 476		
540	2 488		
600	2 510		
660	2 522		
700	2 529		
760	2 536		
800	2 548		
900	2 555		
1000	2 562		

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO



ETAPA DE

OBSERVACIONES: Prueba de Bombeo en Pozo N° 234 (003-3) de Bombeo N° 17 (Ø 100, m) a 11:00 hrs

CONTINAMIENTO

$mb = 0.002 \frac{100 \times 9.8}{0.10} = 19.6 \text{ m}^2/\text{seg}$

$K_s = \frac{1}{b} = \frac{0.1554}{2.1003 \times 10^{-4}} = 73971.9$   
 $b = 2.1003 \times 10^{-4} = 0.00021003 \text{ m}$

$\frac{K'}{b'} = 0.0739894 \times 10^6$

$\frac{1}{B} K_s \left( \frac{r}{b} \right)^2 = \frac{2.3 \times 10^4 \times 2.3(0.26)}{0.20}$

$\frac{1}{B} K_s \left( \frac{r}{b} \right)^2 = \frac{10^4 \times 10^4}{10^4} = 10^4$

$T = 155.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}$

$\frac{1}{r^2} T B = 0.069/2 = 0.0345$

$\frac{1}{r^2} T B = \frac{0.0345 \times 10^4 (0.1554 \times 10^{-4})}{10^4}$

$\frac{1}{r^2} T B = 0.0739894 \times 10^6$

$\frac{1}{r^2} T B = 0.0739894 \times 10^6$

$T = 0.1554 \text{ m}^2/\text{seg}$   
 $Q = 411 \text{ lps}$   
 $K_0 (r/B) = 411$

$T = \frac{0.140}{3(3.14)(20)} (2.79) = \frac{0.3906}{2.5133}$

FIG N° 25

**U. N. A. M.**

FACULTAD DE INGENIERIA

REPRESENTACION SEMILOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

ETAPA DE ABATIMIENTO

TESIS PROFESIONAL

GAUDENCIO VALDEMAR CABRERA PEREZ

ZONA VALLE DEL YAQUI SONORA

LUGAR DISTRITO DE RIEGO N° 41

POZO N° 187 PROF 90 mts

CEDAZO (S) DE 30 A 86 mts

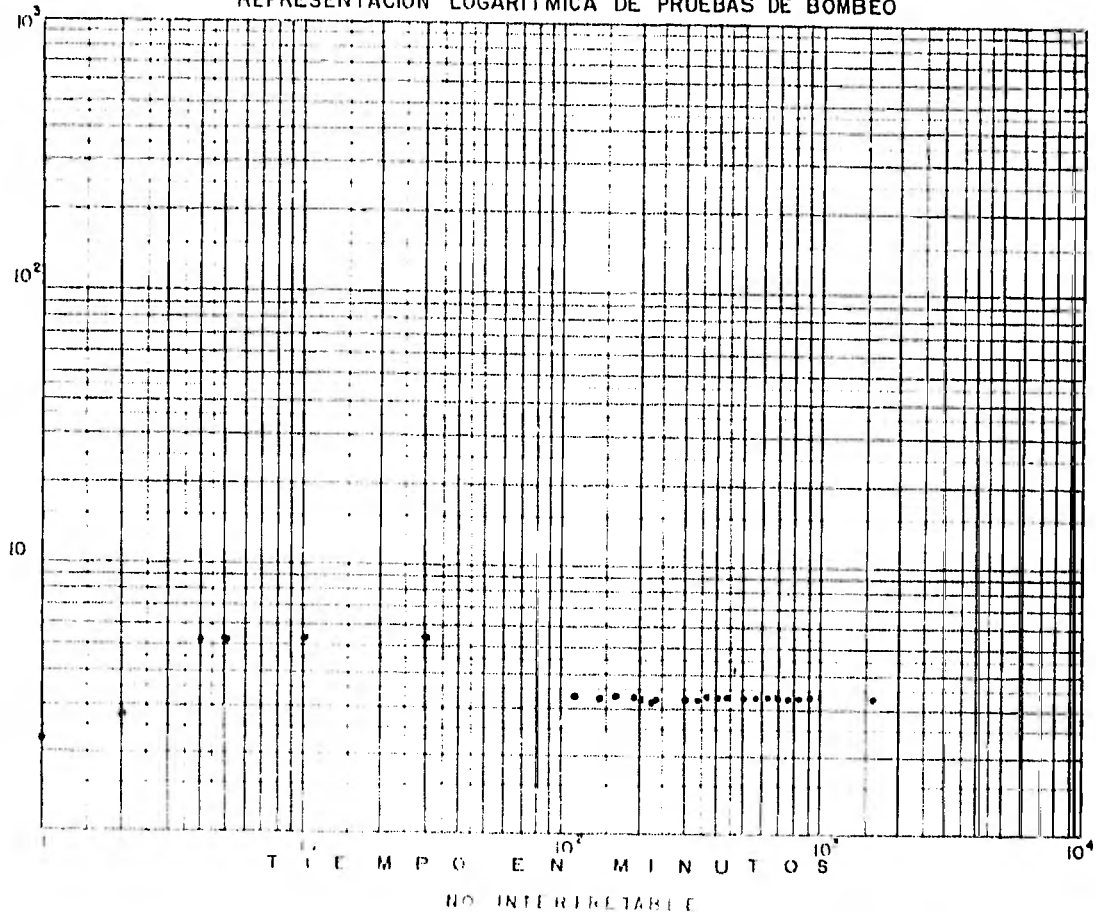
Ø DE SC 10 cm CAUDAL 90 lps

PROF N E 3335 mts CAJERO

FECHA 25/IX/69 DURACION 28 hrs

REPRESENTACION LOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	ABATIMIENTO EN METROS		
0	5.425		
1	5.215		
2	5.215		
4	5.215		
5	5.215		
10	5.115		
30	5.215		
90	5.215		
100	5.215		
110	3.300		
40	3.315		
163	3.355		
180	3.340		
203	3.290		
220	3.245		
240	3.265		
300	3.275		
340	3.295		
370	3.245		
400	3.285		
440	3.285		
500	3.230		
560	3.315		
620	3.315		
700	3.300		
760	3.265		
820	3.295		
900	3.285		
1000	3.285		
1700	3.285		



Observaciones: Pozo con mucho aceite.  
 Pozo de 1 m de diámetro, 90 m de profundidad.  
 Caudal 100 lps de 1 hora.

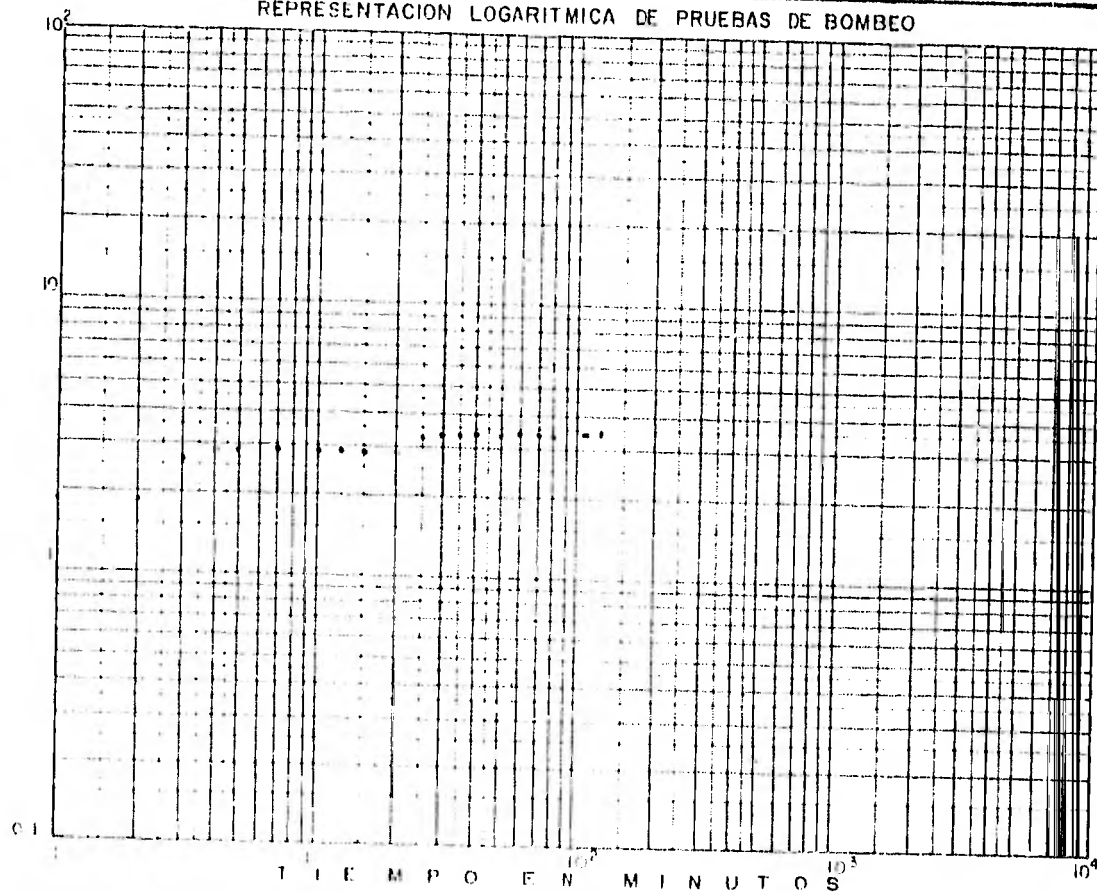
FIG N° 26

U. N. A. M.
FACULTAD DE INGENIERIA
REPRESENTACION LOGARITMICA
TRUENAS DE BOMBEO
ETAPA DE ABATIMIENTO
TESIS PROFESIONAL
AJAJE N° 10 VALLE MAR CARRERA PEREZ

ZONA VALLE DEL YAQUI SONORA  
 LUGAR DISTRITO DE RIEGO N° 41  
 POZO N° 187 PROF 90 mts  
 CEDAZO (S) DE 30 A 86 mts  
 Ø DESC 10" cm CAUDAL 90 lps  
 PROF N E. 3.35 mts CUADRO  
 FECHA . 26/IX/69 DURACION 2 hrs

REPRESENTACION LOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO

TIEMPO ACUMULADO EN HORAS	ABATIMIENTO EN METROS		
0	3.35		
1'	1.81		
2'	1.81		
3'	2.51		
4'	2.84		
5'	2.84		
7'	2.86		
10'	2.87		
13'	2.87		
15'	2.87		
20'	2.87		
25'	3.25		
30'	3.26		
35'	3.27		
40'	3.275		
50'	3.30		
60'	3.31		
70'	3.31		
80'	3.31		
105'	3.31		
120'	3.31		



Observaciones: Este pozo tiene un fondo de 90 mts que  
 las lecturas por meteros cambian  
 por el efecto de la zona de flujo de  
 3.35 mts

FIG N° 27

U. N. A. M.
FACULTAD DE INGENIERIA
REPRESENTACION LOGARITMICA
PRUEBAS DE BOMBEO
TAPA DE RECUPERACION
TESIS PROFESIONAL
JABRINETA VALDEMAR CARRERA SANCHEZ

ZONA VALLE DEL YACQUI SONORA

LUGAR DISTRITO DE RIEGO N° 41

POZO N° 101 PROF 50 m/s

CEDAZO (S) DE 2.4 m A 46 m/s

Ø DESC. 10" cm CAUDAL lps

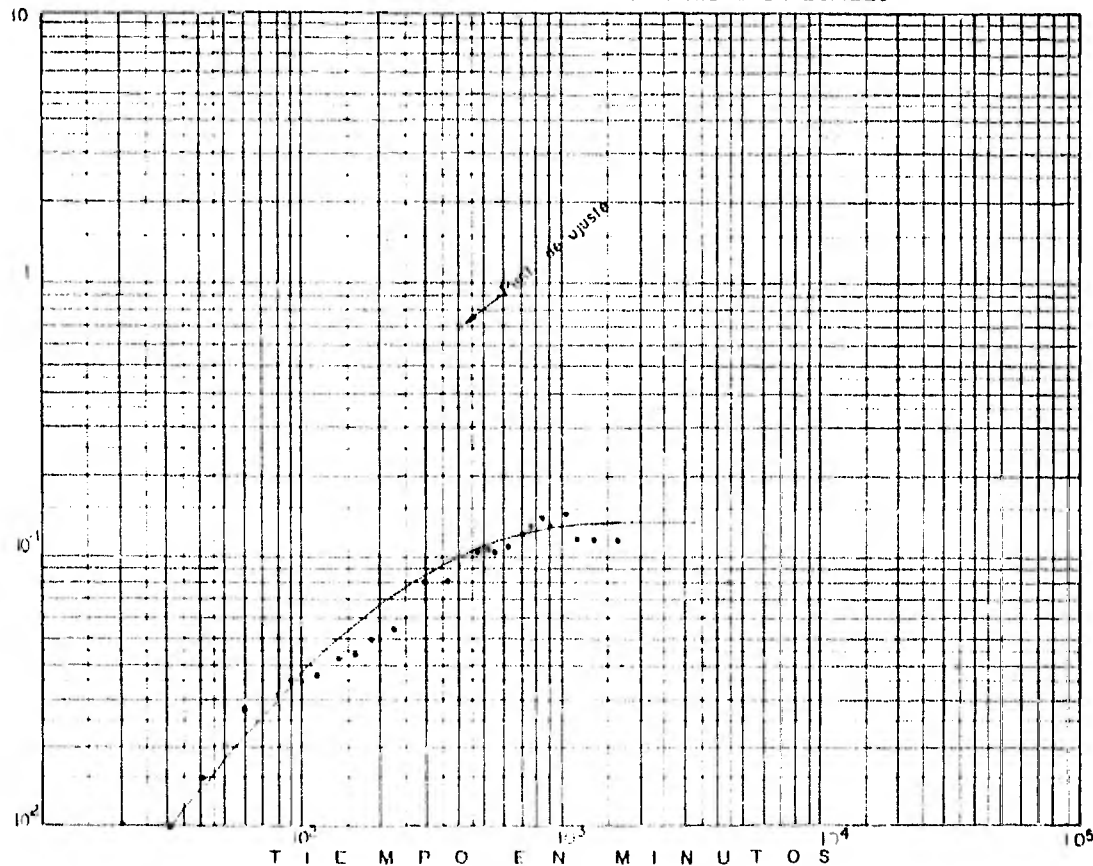
PROF N E. 7530 m/s CUADRO

FECHA 25/IX/69 DURACION 28 hrs

TIEMPO ACUMULADO EN MINUTOS	ABATIMIENTO EN METROS		
0'	7.530		
20'	0.010		
30'	0.010		
40'	0.015		
50'	0.020		
60'	0.028		
80'	0.0310		
90'	0.035		
100'	0.035		
120'	0.037		
145'	0.044		
160'	0.045		
180'	0.050		
200'	0.050		
230'	0.055		
300'	0.080		
360'	0.080		
400'	0.093		
460'	0.105		
500'	0.115		
560'	0.112		
620'	0.120		
700'	0.130		
760'	0.140		
830'	0.145		
900'	0.135		
1005'	0.148		
1200'	0.125		
1400'	C. 1.20		
1700'	0.120		

$W(U, r/B) = 1$   
 $1/U = 1.6 U = 1$   
 $a = 0.23$   
 $1 = 2000 = 12000'$   
 $r/B = 0.5$

REPRESENTACION LOGARITMICA DE PRUEBAS DE BOMBEO



$T = \frac{Q}{4\pi a} W(U, r/B) = \frac{0.0901}{4(3.14)(0.23)} \cdot \frac{0.090}{2.89} = 0.03114 \cdot 1.14 \times 10^{-4} = 4.11 \times 10^{-6}$   
 $4.11 \times 10^{-6} = \frac{410.03114(12000)(1)}{10^6} \cdot S = 0.001494$

Observaciones no se sabe lo que pasó a partir de 1200',  
 ya que no se estaba regando en la zona, no  
 había baterías positivas cercanas, se cambió  
 el caudal del pozo de bombeo.  
 Pozo de observación situado a 130 m de  
 la zona de bombeo a 12:00'.

FIG N° 28

U. N. A. M.
FACULTAD DE INGENIERIA
REPRESENTACION LOGARITMICA
PRUEBAS DE BOMBEO
ETAPA DE ABATIMIENTO
TESIS PROFESIONAL
2011 N. A. L. M. A. - 1969

carga a la Bahía de Tobari frente a la Isla de Huivulai; a lo largo de su recorrido, este arroyo contribuye con sus infiltraciones a la recarga del acuífero, al igual que los canales alta y bajo.

**GEOLOGIA DE LA REGION.** Recientemente en este valle, se realizó un estudio geofísico en un área de aproximadamente 3 200 km<sup>2</sup> con un desarrollo de 385 km de perfil; dicho estudio se hizo mediante la ejecución de sondeos eléctricos resistivos y empleando el sistema Wenner en el desplazamiento de los electrodos.

La región donde se llevó a cabo el estudio, está formada por un paisaje compuesto de una llanura y de lomas bajas con pendientes suaves estrechamente relacionadas con el origen y naturaleza de las rocas que la forman.

Las rocas más antiguas que afloran en la región y que constituyen el basamento geológico, están formados por esquistas y pizarras pertenecientes a la formación conocida regionalmente como complejo Sanobari; son rocas compactas e impermeables, sobre las cuales descansan formaciones de tobas, areniscas y conglomerados estratificados y cementados, con buzamiento regional hacia el Suroeste; esta formación (Baucarit) es de origen continental y la mayoría de sus elementos provienen de la erosión e intemperismo de las rocas volcánicas que forman la Sierra Madre Occidental.

Los resultados que arrojaron los estudios de la geología del subsuelo y de la geoquímica, permiten afirmar que se encuentran formaciones permeables en las que se alojan aguas de muy mala calidad, debido a la presencia de materiales de grano fino (arenas finas y limos) con poca arcilla que se encuentran muy cerca de la superficie (de 2 a 3 m.) en los que se aplican productos químicos, tales como los fertilizantes, asimismo a causa de la migración de agua de mar o de aguas fósiles de origen marino prisioneras en las formaciones arcillosas.

La permeabilidad debe ser variable de un lugar a otro, por causa de la presencia de arcilla en menor o mayor grado; se encuentran también materiales de grano medio a grueso (arenas y gravas) y probablemente boleos de buena permeabilidad. Existen horizontes de lentes de conglomerados o areniscas compactas y/o cementados, de baja permeabilidad, formaciones rocosas que sirven de apoyo a los depósitos aluviales, salvo en algunas fracturas, este horizonte debe ser impermeable cuya profundidad es variable según la zona; se anexan algunos perfiles geológicos de la zona donde se locali

zan las pozos de bombeo y de observación seleccionados para este trabajo (Fig. 11) .

#### INTERPRETACION DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO.-

Como se observa en el cuadro No. 1, se seleccionaron 3 pozos con pruebas de bombeo de larga duración con sus respectivas pozos de observación, también 3 pozos con bombeo de corta duración sin pozos de auxilio, cuyas observaciones del comportamiento del nivel dinámica del agua, se hicieron en el mismo pozo de bombeo.

PRUEBAS DE BOMBEO DE CORTA DURACION.- Con los datos de abatimiento y/o recuperación del pozo de bombeo, se trazaron las gráficas semilogarítmicas abatimiento - tiempo y/o recuperación - tiempo, estas gráficas tienen como finalidad, además de la obtención de los parámetros hidrodinámicos del acuífero, ver si ya se estabilizó o recuperó el nivel del agua, o si todavía presenta una ley de variación descendente o ascendente que deberá tomarse en cuenta para las observaciones durante el abatimiento o la recuperación.

Para la interpretación de las pruebas de bombeo en el mismo pozo, debe tomarse en cuenta que los abatimientos no corresponden exclusivamente a las pérdidas en la formación geológica, sino que incluyen las pérdidas locales en el pozo, las cuales son iguales o mayores que las de la formación.

Otra observación que deberá tomarse en cuenta es en el caudal específico, que generalmente cuando son caudales específicos altos, nos indican coeficientes de transmisibilidad altos, encontrándose esta reciprocidad también entre los valores bajos, pero éstos, no aportan un valor exacto del coeficiente de transmisibilidad, ya que en ocasiones se encuentra afectado por condiciones tales como penetración parcial, pérdidas de pozo y fronteras hidrogeológicas. En la mayoría de los casos, esos factores adversos, afectan al caudal específico y el valor real de la transmisibilidad es mayor que el calculado mediante ese dato. Sin embargo, siempre es útil estimar aunque sea en forma aproximada el valor de la transmisibilidad a fin de tener una idea del rango que se puede presentar en una zona de estudio.

Las pruebas cortas de bombeo (con duración de 2 a 8 horas), se realizan en regiones donde existen pozos perforados para conocer en forma aproximada la transmisibilidad del acuífero en diferentes puntos, ya que con estas pruebas es posible en general definir la pendiente de la recta de Jacob.



# SECCIONES GEOLOGICAS ESQUEMATIZADAS

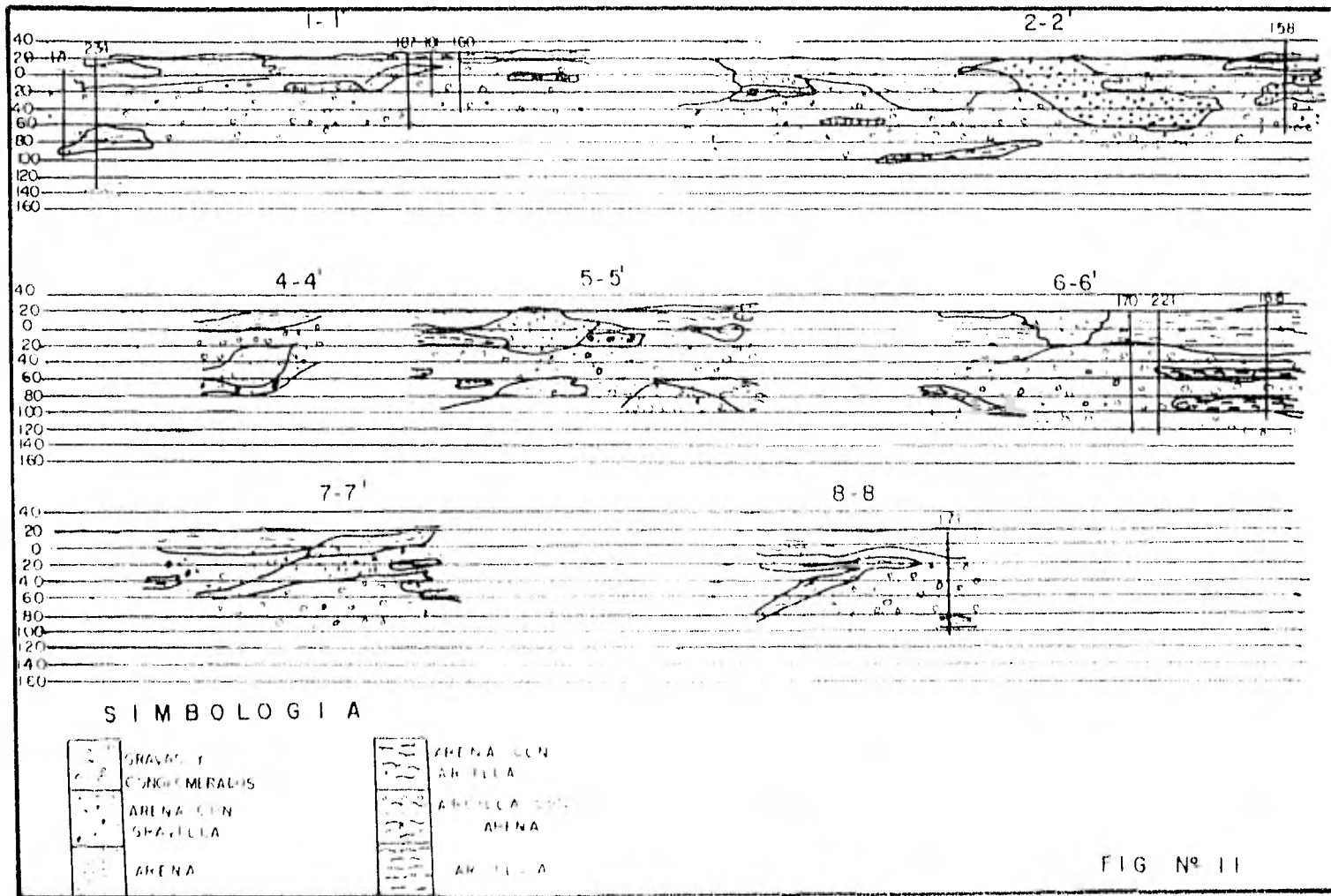


FIG Nº 11



Por otro lado, la transmisibilidad obtenida para las pruebas de corta duración se considera representativa del espesor penetrado por el cedazo del pozo, ya que en esta parte corta de la prueba, el flujo es predominantemente horizontal, no manifestándose todavía efectos de penetración parcial, semiconfinamiento, fronteras laterales, etc.

Como se muestra en el Cuadro 1, los pozos seleccionados en los cuales se efectuaron las pruebas de bombeo de corta duración (de 4 a 7 horas en la etapa de abatimiento y de 1 a 2 horas en la etapa de recuperación), sin pozos de observación, son los siguientes:

Pozo No. 158	(Fig. No. 13),	etapa de abatimiento
	(Fig. No. 14),	etapa de recuperación
Pozo No. 160	(Fig. No. 15),	etapa de abatimiento
	Fig. No. 16),	etapa de recuperación
Pozo No. 168	(Fig. No. 17),	etapa de abatimiento
	(Fig. No. 18),	etapa de recuperación

Se anexa un croquis (Fig. No. 10), de la localización de los pozos de bombeo de corta y de larga duración, seleccionados para este trabajo.

Se anexa también, un esquema del ademe ciego y del ranurado de cada pozo en particular (Fig. No. 12) y de los diferentes estratos geológicos que atraviesan.

En estos pozos con bombeo de corta duración, las lecturas de abatimiento-tiempo, al llevarlos a la gráfica semilogarítmica, se observó que los abatimientos tenían una ley de variación semejante a un tramo de recta y sin ninguna desviación que pudieran reportarnos aportaciones de otras fuentes; debido a esto, se empleó el método de Jacob para obtener los coeficientes de transmisibilidad representativos.

Los coeficientes de transmisibilidad para estas pruebas de bombeo de corta duración, resultaron entre  $6.295 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg.}$  y de  $59.45 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg.}$  en las etapas de abatimiento y de  $47.21 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg.}$  a  $79.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg.}$  en las etapas de recuperación, (cuadro No. 1), se puede tomar un promedio de ambos coeficientes como representativos locales.

# C R O Q U I S

## PROFUNDIDADES ADEMÉS Y ESTRATOS QUE ATRAVIESAN LOS POZOS SELECCIONADOS DEL VALLE DEL YAQUI SONORA

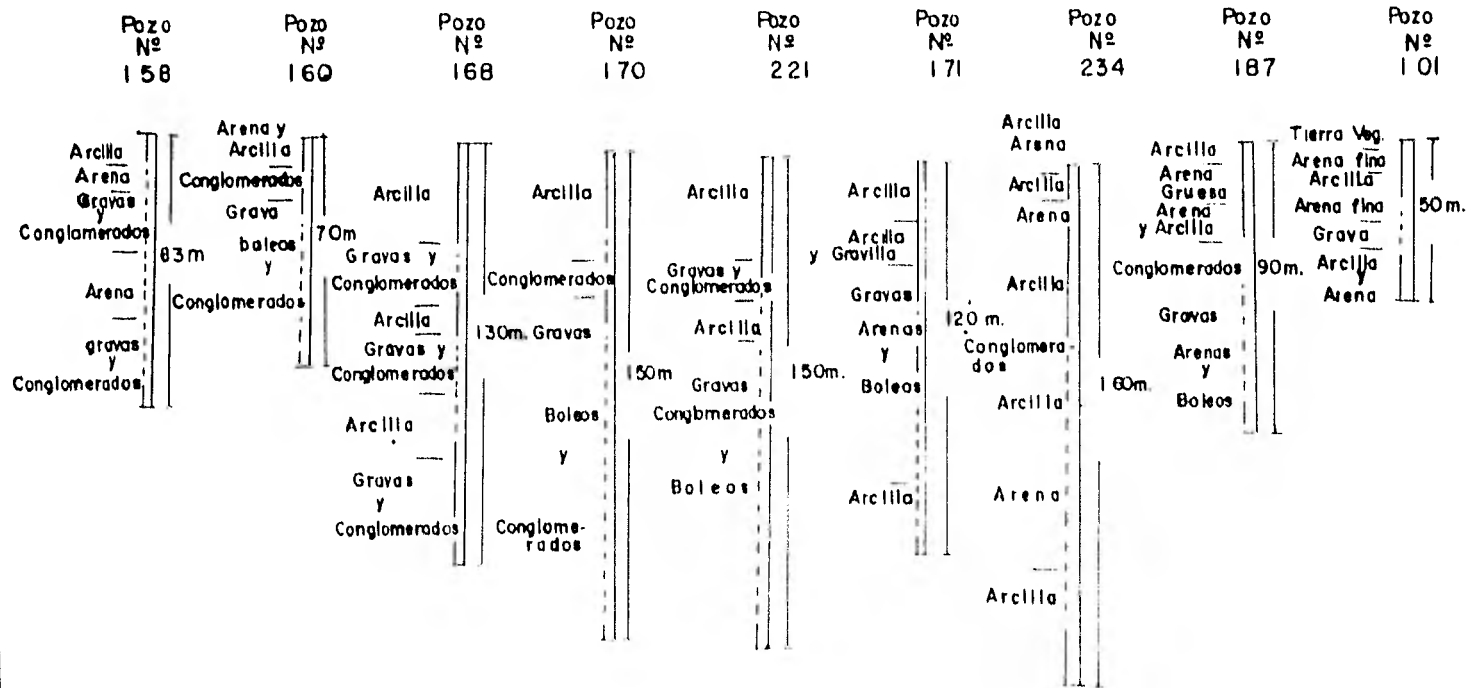


FIG. N° 12

PRUEBAS DE BOMBEO DE LARGA DURACION.- En todos los pozos perforadas y con fines de estudio, además de efectuarse un bombeo inicial de limpieza hasta que se extrae agua clara y libre de arena (etapa de desarrollo del pozo), se hace además (si es posible) una prueba formal de bombeo de larga duración (uno o más días), con un caudal constante, que si se tiene un pozo de observación, servirá para determinar las características del acuífero como son: la transmisibilidad, el coeficiente de almacenamiento y fronteras cercanas impermeables.

En varias ocasiones se han tratado de interpretar los abatimientos del pozo de bombeo con objeto de obtener a partir de ellos las parámetros del acuífero, eliminando así la necesidad de los pozos de observación. La importancia de lo anterior, radica en que las pruebas de bombeo formales (de larga duración con pozo de observación) son sumamente costosas, sobre toda, si tiene que ser perforado el pozo de bombeo mismo.

Si existiera alguna teoría, en la que no hubiera necesidad de efectuar correcciones al interpretar los abatimientos generados en el pozo mismo de bombeo, implicaría que no se requirieran pozos de observación, y daría como consecuencia, que todos los pozos existentes en una región dada, servirían para dicho propósito y consecuentemente, el costo de los estudios se abatiría de manera notable.

Las teorías para las pruebas de bombeo sin pozo de observación han tenido éxito parcial en la determinación aproximada de la transmisibilidad, fracasando rotundamente respecto al coeficiente de almacenamiento.

Los pozos seleccionados en donde se efectuaron pruebas de bombeo de larga duración (de 28 a 48 horas y de 2 horas, en las etapas de abatimiento y de recuperación respectivamente) con pozos de observación son los siguientes:

Pozo No. 170 (De bombeo, Fig.No. 19), etapa de abatimiento  
( Fig. No.20), etapa de recuperación

Pozo No.221 (De observación, Fig. No. 21), etapa de abatimiento  
 $r = 500$  m del pozo de bombeo No. 170 (Fig. No. 22), etapa de recuperación

Pozo No. 171 (De bombeo, Fig. No. 23), etapa de abatimiento  
( Fig. No. 24), etapa de recuperación

Pozo No. 234 (De observación, Fig. No. 25), etapa de abatimiento  
 $r = 1000$  m del pozo de bombeo No. 171.

Sin lecturas en la etapa de recuperación - tiempo.

Pozo No. 187 (de bombeo, Fig. No. 26), etapa de abatimiento  
(Fig. No. 27), etapa de recuperación  
Pozo No. 101 (de observación, Fig. No. 28), etapa de abatimiento  
 $r = 1000$  m del pozo de bombeo No. 187  
Sin lecturas en la etapa de recuperación - tiempo.

Las lecturas obtenidas de abatimiento - tiempo, de todos los pozos de bombeo y de observación, se graficaron en papel doble logarítmica (exceptuando el pozo No. 234), con las gráficas correspondientes se buscó la adaptación de curvas tipo, hasta que se encontró que el mejor ajuste se logró con la de Hantush, para acuíferos semiconfinados, lo cual concuerda con el sistema físico que se describió en los aspectos geológicos.

Con la técnica de puntos homólogos de las curvas tipo, se obtuvieron, con base en sus coordenadas:  $a$ ,  $t$ ,  $w$ ,  $(U^r/B)$  y  $U$ , los coeficientes de transmisibilidad y de almacenamiento.

Los coeficientes de transmisibilidad obtenidos para las etapas de abatimiento oscilante entre  $31.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg.}$  a  $91.50 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg.}$  y de  $1.49 \times 10^{-3}$  a  $4.01 \times 10^{-3}$  para el coeficiente de almacenamiento. Se puede tomar un promedio de ambos coeficientes como representativos locales del área abarcada por la influencia del bombeo de los pozos.

Las lecturas de abatimiento - tiempo del pozo de observación No. 234, se graficaron en papel semilogarítmico, curva de campo a la que se le aplicó el método gráfico de Hantush para obtener los parámetros hidrodinámicos respectivos. (Ver Cuadro No. 1).

Las etapas de recuperación - tiempo de los pozos de bombeo y de observación se graficaron en papel semilogarítmico. Los puntos obtenidos se alinean aproximadamente a un tramo de recta (Método de Jacob) y se cumple además, la condición de que el tiempo inicial para la interpretación es cinco veces mayor que la relación del producto del coeficiente de almacenamiento por la distancia al cuadrado del pozo de bombeo al pozo de observación, dividido entre el coeficiente de transmisibilidad ( $t > 55 r^2/T$ ). Los coeficientes hidrodinámicos resultantes, oscilan entre  $73.20 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg.}$  y  $413.20 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg.}$

El pozo No. 187 con bombeo de larga duración (28 horas) en su etapa de abatimiento (Fig. No. 26) y de corta duración (2 horas) en su etapa de recuperación (Fig. No. 27), dieron lugar a gráficas no interpretables. Esto tal vez se deba a que cuando se efectuó la prueba de bombeo, el agua del pozo contenía aceite, que impidió hacer lecturas correctas con la sonda eléctrica.

Se anexa el cuadro No. 1, como resumen de los datos de cada pozo, así como sus coeficientes de transmisibilidad y de almacenamiento obtenidos.

#### OBSERVACIONES

- 1.- En el Valle del Yaqui, Sonora, actualmente se encuentran pozos con profundidades hasta de 300 m; ésto nos hace pensar que las pozos de bombeo y de observación seleccionados para este trabajo, son parcialmente penetrantes.
- 2.- En el comportamiento del nivel dinámico del agua, observada dentro de las gráficas abatimiento - tiempo de los pozos antes mencionados, no hubo ninguna manifestación de penetración parcial (estabilización del nivel dinámico del agua); tal vez, en bombeos de más larga duración, sí llegue a detectarse.
- 3.- Los pozos de observación se encuentran muy distantes de sus pozos de bombeo, sobre todo los pozos Núms. 234 y 101 ( $r=1000$  m), a pesar de lo cual tuvieron abatimientos de 0.516 m y de 0.120 m. respectivamente. En pozos más cercanos, la influencia del bombeo es más real y más conveniente para observarse.

## C A P I T U L O V

### CONCLUSIONES

Debido a la gran variedad de pruebas de bombeo existentes en la zona del Valle del Yaqui, Sonora, sólo se presentaron algunas que fueron seleccionadas a juicio propia.

Una vez concluidas las pruebas de bombeo, se procede inmediatamente a la graficación de los datos obtenidos, en escala semilogarítmica o logarítmica según el caso.

1.- Las pruebas de bombeo con pozos de observación, nos ayudan a obtener información de los coeficientes de transmisibilidad ( $T$ ) y de almacenamiento ( $S$ ), además, dichos pozos de observación se hacen necesarios para saber si existen efectos en ellos causados por el bombeo.

2.- Cuando el coeficiente de transmisibilidad, sea de interpretación dudosa ya sea por la corta duración de la prueba o porque no se defina correctamente el tramo recto en la gráfica, se podrá usar otro método para tener una idea (vagamente) de la transmisibilidad, dicho método es la determinación del caudal específico.

3.- Los cortes geológicos nos permiten tener una idea de las teorías que pudieran ser aplicables a la zona en estudio, posteriormente confirmarlas con los resultados de las pruebas de bombeo.



4.- Las pruebas de bombeo de corta duración ofrecen las siguientes ventajas: permiten la determinación de la capacidad de explotación del acuífero con poco costo, un menor tiempo empleado para dicha prueba ya que a veces no es posible obtener o realizar una prueba de bombeo de larga duración, ya sea por estar restringida a un tiempo definido o a un determinado presupuesto; en general cualquier prueba de bombeo se limita a las condiciones existentes, como por ejemplo (además de las ya dichas), en épocas de lluvia, no se hace necesario el bombeo de pozos, sin embargo, en épocas de sequía sí.

5.- Cuando se tienen pozos de observación distantes al pozo de bombeo, se aconseja una prueba de bombeo de larga duración.

6.- Las pruebas de bombeo de larga duración, están muchas veces afectadas por la interferencia del bombeo de pozos cercanos.

7.- No se efectuarán pruebas de bombeo, si el pozo de bombeo no ha sido previamente limpiado y desarrollado hasta ver que el agua que se extrae salga perfectamente limpia.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- GEOHYDROLOGY  
Roger J.M. De Wiest
- 2.- HIDROLOGIA SUBTERRANEA  
Custodio y Illamas
- 3.- HIDROGEOLOGIA PRACTICA  
José Luis Pulido
- 4.- HIDRAULICA SUBTERRANEA  
S.W. Lohman
- 5.- MATERIAL DE ARCHIVO  
Pruebas de Bombeo S.A.R.H.
- 6.- INSTRUCTIVO SOBRE PRUEBAS DE BOMBEO  
S.A.R.H. ( Junio, 1980 )
- 7.- APUNTES DEL CURSO DE GEOHIDROLOGIA  
Ing. Jaime A. Tinajero González  
Facultad de Ingeniería U.N.A.M.