



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS  
HIDRAULICAS DE LAS UNIDADES  
HIDROESTRATIGRAFICAS EN EL ESTADO  
DE AGUASCALIENTES

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO GEOLOGO  
P R E S E N T A :  
ARNULFO SANCHEZ VALERIO



MEXICO, D. F.

ABRIL DE 1996

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
00-1-018

**SR. ARNULFO SANCHEZ VALERIO**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. J. Joel Camillo Rivera y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS HIDRAULICAS DE LAS UNIDADES  
HIDROESTRATIGRAFICAS EN EL ESTADO DE AGUASCALIENTES**

- I INTRODUCCION
  - II GEOLOGIA DEL AREA DE ESTUDIO
  - III METODOLOGIA
  - IV DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS  
HIDRAULICAS
  - V DISCUSION DE RESULTADOS
  - VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS  
FIGURAS Y TABLAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Ciudad Universitaria, a 18 de marzo de 1998  
EL DIRECTOR

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS\*RL/LR\*glg

## ÍNDICE

### RESUMEN

### AGRADECIMIENTOS

#### 1.- INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Descripción de la región estudiada	3
1.4 Fislografía	5
1.5 Marco teórico	7

#### 2.- GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1.- Geología regional	12
2.2.- Geología local	15
2.3.- Tectónica	16

#### 3.- METODOLOGÍA

3.1.- Actividades de gabinete	17
3.2.- Descripción de las pruebas de bombeo	17
3.3.- Secciones geológicas	18

#### 4.- DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

4.1 Implementación del modelo numérico	23
--	----

5.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS	25
-----------------------------	----

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	28
----------------------------------	----

### REFERENCIAS

### FIGURAS Y TABLAS

## AGRADECIMIENTOS

El financiamiento para llevar a cabo los estudios de hidrología subterránea en el estado de Aguascalientes fue proporcionado por el Gobierno del Estado, a través de la Subsecretaría de Ecología de dicho estado.

Agradezco una beca, proporcionada por el Instituto de Geofísica a través del proyecto externo PE-030 del Dr. J. Joel Carrillo R., y el apoyo proporcionado por dicho Instituto y la Subsecretaría de Ecología del estado de Aguascalientes.

El presente trabajo se realizó bajo la dirección y supervisión del Dr. J. Joel Carrillo R., a quien agradezco haber trabajado a su lado y que me haya impulsado en un área de interés para mí.

Igualmente son apreciables, los comentarios del M. En C. Antonio Cardona, del M. En I. Eliseo Vasquez, del M. En I. Eduardo Graniel, del Ing. Héctor Macías, del Ing. Dionisio Valdez y del Ing. Emiliano Campos quienes contribuyeron a enriquecer el contenido del presente trabajo.

Deseo expresar mi reconocimiento a mis amigos y al grupo de trabajo con el que conviví en la elaboración de esta Tesis, de quienes aparte de su compañía y amistad, participé de sus opiniones y comentarios hacia el presente trabajo.

Finalmente, extendiendo mi gratitud y aprecio a mis hermanos y, especialmente a mis padres, quienes han sido en mi formación un soporte invaluable, ayudándome activamente a realizar diferentes proyectos que me he planteado.

POR TODO SU APOYO Y MÁS, MUJ EN ESPECIAL, A MIS AMIGOS :

ANTONIO S.  
ALEJANDRO  
ANGELES  
CARLOS S.  
CARLOS L.  
ELIZABETH V.  
FRANCISCO C.  
GERMAN O.  
GABRIEL S.  
HECTOR T.  
HECTOR P.  
JORGE R.  
JORGE W.  
JAVIER C.  
MARTIN T.  
MIGUEL A. S.  
MARIO O.  
SANTIAGO S

A MIS SOBRINOS ALEJANDRO Y CARLOS  
CON CARINO Y AMOR

## RESUMEN

Las características hidráulicas de las unidades hidroestratigráficas del subsuelo del estado de Aguascalientes se estimaron con 15 pruebas de bombeo, las cuales fueron interpretadas con el modelo numérico de Rathod y Rushton (1984).

Los resultados del presente estudio, indican que el modelo hidrogeológico de la región consiste de un acuífero que consta de dos unidades hidroestratigráficas, una superior, granular y otra inferior, fracturada.

La conductividad hidráulica de la unidad hidrogeológica inferior tiene una media de  $10^{-3}$  m/s y, por lo general es dos órdenes de magnitud mayor a los valores obtenidos en la unidad hidrogeológica superior (medio granular). Esta última muestra una conductividad hidráulica horizontal ( $K_h$ ) media de  $6 \times 10^{-5}$  m/s. Los valores altos de la conductividad hidráulica vertical ( $K_v$ ) de la unidad hidrogeológica inferior, se deben a la presencia de fracturas.

Los valores de la conductividad hidráulica vertical ( $K_v$ ) en la unidad inferior se mantienen relativamente constantes con la profundidad, en la unidad superior los valores de la conductividad hidráulica horizontal ( $K_h$ ) varían con la profundidad.

La modelación numérica de las pruebas de bombeo muestra pérdidas de carga hidráulica entre nueve y doce que son probablemente causadas por un mal desarrollo e incrustaciones en el pozo durante su operación y deficiencias durante su perforación y construcción. Tanto la unidad inferior como la superior muestran condiciones equivalentes a un semiconfinamiento impuestas por la presencia de flujo vertical ascendente de agua termal. El coeficiente de almacenamiento tiene valores entre 0.0007 y 0.004 y la porosidad efectiva es de entre 0.01 y 0.3, valores congruentes con las condiciones de litología. Geológicamente el acuífero es de tipo libre.



## I INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El presente trabajo es parte de los resultados de las investigaciones hidrogeológicas que se realizaron en el área de estudio dentro del proyecto de "Determinación del Flujo y Potencialidad del Agua Subterránea en el estado de Aguascalientes" llevado a cabo por el Instituto de Geofísica bajo patrocinio del Gobierno del Estado, a través de la Subsecretaría de Ecología de dicho estado.

Las fuentes de agua subterránea del territorio del estado revisten gran importancia, por ser las que sustentan, en mayor medida, el desarrollo de sus principales sectores productivos y los abastecimientos de agua a las poblaciones. El agua subterránea beneficia una superficie mucho mayor, que aquélla que se riega con aguas superficiales, y se satisface casi la totalidad de la demanda actual de agua para usos doméstico, público, urbano e industrial.

En el conocimiento tradicional las condiciones de movimiento del agua subterránea se determinan por métodos que consideran al sistema como bidimensional, donde la dimensión vertical de flujo es muy pequeña, comparada con la horizontal; en la definición de las características hidráulicas el conocimiento de la geología ha tomado poca relevancia en la metodología empleada, así mismo las pérdidas de carga en el pozo de bombeo son esencialmente despreciadas, por lo anterior, los métodos empleados en estos trabajos no siempre pueden considerarse como resolutivos.

Este trabajo se realizó con un estricto control estratigráfico de la región de estudio y de las características constructivas de los pozos de bombeo para la determinación de los parámetros hidráulicos de las unidades geológicas. Los resultados permitieron conocer la influencia de éstos en un modelo hidrogeológico tridimensional de funcionamiento.

## **1.2 Objetivos**

Los objetivos del presente trabajo son:

- 1. Determinar las características hidráulicas (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, rendimiento específico) de las unidades hidroestratigráficas del subsuelo del estado de Aguascalientes a través de la interpretación de pruebas de bombeo, en las que las condiciones geológicas se integraron al análisis de las pruebas. Estas determinaciones deben incluir efectos por las pérdidas de carga en el pozo debido a construcción y operación ineficientes.**

### **1.3 Descripción de la región estudiada**

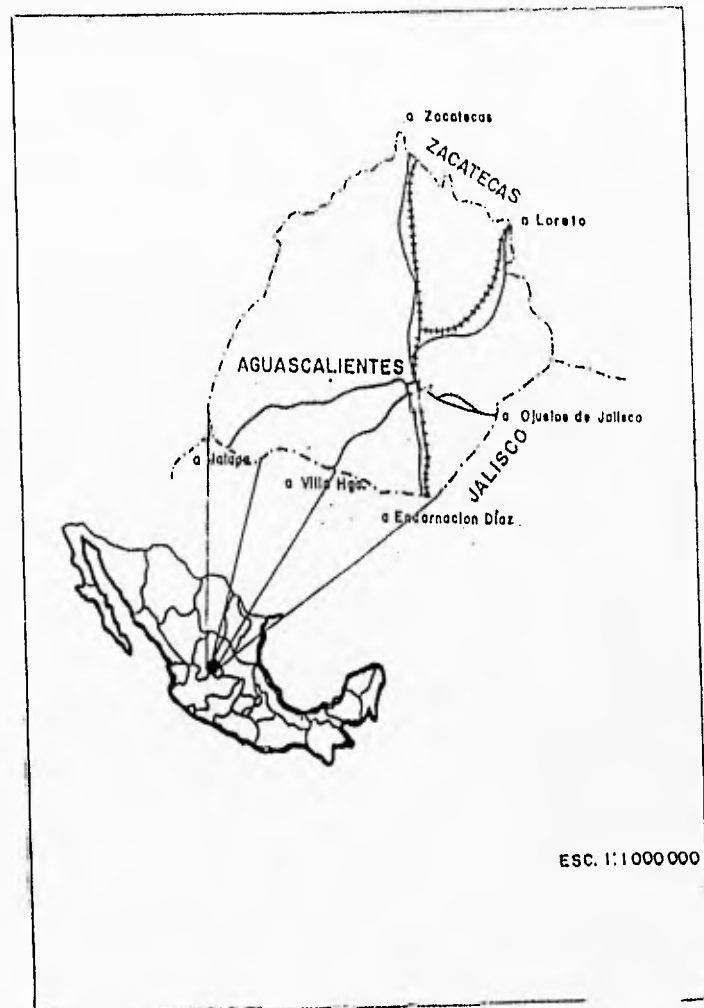
#### **1.3.1. Localización**

El estado de Aguascalientes se localiza en el centro de la República, entre las coordenadas geográficas  $21^{\circ} 37'$  -  $22^{\circ} 28'$  de latitud norte y las  $101^{\circ} 50'$  -  $103^{\circ} 00'$  de longitud oeste. Colinda con el estado de Zacatecas excepto por una porción pequeña, al oriente, donde limita con el estado de Jalisco.

#### **1.3.2. Vías de comunicación**

El estado tiene una magnífica red de carreteras, que intercomunican la totalidad del estado, merced al apoyo de un profundo sistema de caminos de segundo y tercer orden. donde destacan las rutas federales: México-Ciudad Juárez, No 45, que atraviesa el estado de sur a norte y la Tampico-Barra de Navidad, No 70, que lo recorre de este a oeste. Ambas confluyen en la Ciudad de Aguascalientes. De este modo el estado tiene salida directa a los cuatro puntos cardinales. A nivel intra-estatal existe una abundante trama de caminos pavimentados que une las poblaciones más importantes con las carreteras principales, así como una extensa malla de terracerías, caminos vecinales y brechas que intercomunican prácticamente a la totalidad de pequeños poblados, rancherías y zonas agrícolas.

FIG 1.3 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



#### 1.4. Fisiografía

De acuerdo a la clasificación de Raisz (1964), el estado de Aguascalientes se encuentra dentro de dos provincias fisiográficas: La Sierra Madre Occidental y El Altiplano Mexicano o Mesa Central.

La provincia de la Sierra Madre Occidental se inicia en la frontera con los Estados Unidos, tiene una dirección NW-SE. Está limitada al sur con la provincia del Eje Neovolcánico, al oeste con las provincias del Desierto Sonorense y la Llanura Costera del Pacífico. Al este colinda con la provincia de Sierras y Bolsones y la extensión occidental de la Mesa Central y Sierra Madre Oriental. Hacia el oriente, la Sierra Madre Occidental está constituida por valles y sierras alargadas de orientación NW-SE y NE-SW. Esta provincia, dentro del estado de Aguascalientes, está representada por la Subprovincia de Sierras y valles Zacatecanos, la cual se localiza al oeste abarcando cerca de 2,634 km<sup>2</sup> del estado, comprende totalmente los municipios de Calvillo y San José de Gracia y parte de los municipios de Aguascalientes, Cosío, Jesús María, Pabellón de Arteaga y Rincón de Romos, con un avenamiento predominante a través de valles hacia el NE. La provincia de la Mesa Central, limita al norte y este con la Sierra Madre Oriental, al oeste con la Sierra Madre Occidental; al sur con la provincia del Eje Neovolcánico, está formada por amplias llanuras interrumpidas por sierras dispersas principalmente de origen volcánico; dentro del estado esta provincia está representada por la subprovincia de los Llanos con altitudes que oscilan entre 2,000 y 2,500 msnm se caracteriza por lomeríos redondeados y de pendiente suave, Existen dos llanos de este tipo, el de Ojuelos que Aguascalientes comparte con Jalisco y Guanajuato y el de Aguascalientes que se extiende al oriente de la ciudad, cuyas superficies están entre 2,300 msnm; existen algunos altos como el cerro el Espía con 2,600 m de altitud.

FIG. 1.4 RELACIÓN DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES CON LAS PROVINCIAS FISIOGRAFICAS (RAISZ, 1959)



## 1.5 Marco Teórico

### 1.5.1. Métodos Analíticos

Los métodos de interpretación de pruebas de bombeo se encuentran ligados a los medios geológicos en los cuales se presentan los problemas, estos pueden resumirse en dos medios: granular y fracturado, para la aplicación de los métodos apropiados de cálculo de las características hidráulicas es necesario esclarecer sus diferencias.

La interpretación de pruebas de bombeo está encaminada a obtener información para determinar las interrogantes del flujo de agua, que son: dirección y velocidad del movimiento y volumen disponible. Para lo cual, se aplicarán los principios del flujo del agua subterránea dentro de un marco multidisciplinario. El desarrollo teórico-práctico que define el comportamiento de un acuífero sujeto a bombeo se define por medio de la relación de Theis (1935). Los métodos de solución se concentran al flujo en medios porosos, en algunos casos esas soluciones eran usadas en problemas de medios fracturados, donde no siempre esos métodos pueden considerarse como resolutivos.

Las pruebas de bombeo tienen como objetivo fundamental, determinar el valor de la conductividad hidráulica ( $k$ ) horizontal y vertical, y el coeficiente de almacenamiento ( $S$ ). A este respecto, para los medios granulares será necesario recordar los métodos tradicionales de cálculo basados en datos de evolución del nivel dinámico ( $s$ ) contra el tiempo de bombeo ( $t$ ). Su empleo se debe adaptar a una serie de condiciones teóricas de la geología imperante y de las características constructivas del pozo, consideradas en el modelo básico de Theis (1935). Este considera un acuífero confinado con extensión infinita, donde el radio del pozo es infinitamente pequeño, el gasto de extracción es constante, etc. En el caso en que se tuviese un acuífero parcialmente confinado, los datos de las pruebas de bombeo se analizarán por medio del método de Hantush (1956), con lo que se podría además determinar el factor de infiltración de la capa confinante. Si se tiene información geológica que indique que los datos  $s - t$  provienen de un acuífero libre (Boulton, 1955), se le deberá dar este trato a la información. En forma similar, una prueba de bombeo que se desee analizar por medio de métodos simplificados como la línea recta de Cooper y Jacob (1946), deberá cumplir con la limitación del tiempo mínimo de aplicación del método, entre otras.

Los métodos de curvas tipo y de línea recta, para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, consideran que los acuíferos probados han sido penetrados totalmente por pozos que tienen un diámetro pequeño y que no producen efectos de almacenamiento. Asimismo, se incluye que el acuífero es de distribución infinita, significa que no existen barreras ni de recarga ni

impermeables que puedan ser interceptadas por el cono de influencia del bombeo. Por supuesto, se considera como parte de la solución que, el medio es homogéneo e isótropo y que la prueba realizada se inicia desde un nivel cero de bombeo (en condiciones estáticas) y que el caudal extraído es constante durante el tiempo de bombeo. En dichas soluciones se establece también, que el flujo hacia el pozo es horizontal. Estos últimos dos aspectos implican que las componentes verticales de flujo no se consideran excepto cuando se tiene aporte de una capa semiconfinante.

Para los problemas en medios fracturados, los métodos clásicos de análisis en medios porosos no son recomendables; agregando a esto, en muchos casos las limitantes de los diversos métodos comunes de medios poroso que no son del todo comprendidos cuando se usan como forma de solución.

Existe un punto muy importante en el uso de diversos métodos diseñados para determinar T y S en medios fracturados, éste es la definición de algunos parámetros físicos de las fracturas que forman parte en la solución de las ecuaciones respectivas, tales como su localización, longitud, ancho y continuidad, así como el tamaño, distribución y porosidad de los bloques formados por las fracturas, etc., además de la necesidad, en casos, de pozos de observación para determinar la potenciometría, incluso a diferentes profundidades; estos conceptos implican que los problemas en medios fracturados no tienen una solución universal a través de algún método específico. Los métodos ya diseñados se aplicarán de acuerdo a la naturaleza física del problema, así como la escala tanto en tiempo como en dimensiones.

Para realizar la interpretación de una prueba de bombeo en medios fracturados es necesario conocer:

- Si existe flujo radial al pozo o lineal a las fracturas que proveen el pozo
- Las pérdidas de carga en el pozo y en el acuífero
- El almacenamiento en el pozo - fractura
- Qué tipo comparativo de  $k$  tiene la fractura
- Las condiciones geológico - hidráulicas que controlan el sistema
- En caso de que haya pozo de observación, la variación de los datos entre éste y el de bombeo.

Lo anterior es importante pues la gráfica  $s-t$ , puede ser similar para una fractura horizontal o vertical, especialmente cuando éstas se encuentren en un medio de gran espesor asimismo, un medio fracturado y un medio granular no confinado mostrarán curvas en la misma forma. Por lo que se deben conocer lo más detalladamente posible las condiciones geológicas, así como las hidrológicas de donde provienen los datos de las pruebas.



El siguiente paso a realizar en la interpretación de una prueba de bombeo, es su gráfica unitaria para t-s en trazado doble logaritmo y definir las condiciones implícitas en las gráficas, así como la naturaleza geológica del medio. Debido a las limitantes de los métodos analíticos y que no consideran ni las condiciones geológicas ni las condiciones constructivas del pozo se buscó un método alternativo, encontrando, que los métodos numéricos incluyen las variables indicadas.

### **1.5.2.Métodos numéricos**

Una parte primordial en la definición del comportamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea es la determinación de los parámetros de control del movimiento del agua subterránea, (las conductividades hidráulicas vertical y horizontal, así como el coeficiente de almacenamiento y porosidad efectiva). En este trabajo, el cálculo respectivo se realizó por medio de un modelo numérico (Rathod y Rushton, 1991) con el que se interpretaron datos de pruebas de bombeo realizadas con anterioridad en pozos del área estudiada. Esta herramienta permitió evaluar conceptos no calculados con anterioridad.

Muchos de los conceptos que afectan significativamente la respuesta de un acuífero sujeto a bombeo en un pozo no han sido incluidas en las soluciones analíticas clásicas (curvas tipo). Sin embargo, cuando éste es el caso los métodos numéricos pueden ser usados para representar el comportamiento particular de un acuífero o incluso un sistema acuífero.

Los factores que se incluyen en el modelo numérico, son de particular importancia en especial cuando se consideran las condiciones de campo en las cuales la mayoría de las pruebas se realizan. Estos son:

- radio finito del pozo
- almacenamiento de agua en el pozo
- variaciones en el caudal de extracción
- recuperación (extracción cero)
- barreras externas impermeables y de carga constante (recarga)
- variación del espesor saturado
- conductividad hidráulica que varía horizontalmente
- conductividad hidráulica que varía con la profundidad
- coeficiente de almacenamiento que varía horizontalmente
- coeficiente de almacenamiento que varía con la profundidad
- condiciones semiconfinadas
- recarga intermitente
- respuesta de drenado retardado
- pérdidas de pozo no lineales
- aporte de zonas fracturadas
- penetración parcial

- cambio de condiciones confinadas a libres.

Los modelos numéricos desarrollados por Rushton y Redshaw (1979) y por Rathod y Rushton (1984), resuelven la siguiente ecuación diferencial que describe el flujo radial de agua hacia un pozo, incluyendo componentes verticales de flujo (Jones y Rushton, 1981):

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( bK_r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + \frac{b}{r} \left( K_r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + bK_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = S \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1)$$

donde

- $r$  = ordenada radial (m)
- $z$  = ordenada vertical (m)
- $b$  = espesor saturado (m)
- $K_r, K_z$  = conductividad hidráulica radial y vertical (m/s)
- $s$  = abatimiento (m)
- $S$  = coeficiente de almacenamiento

La discretización del campo de flujo radial hacia un pozo, se realiza por medio de una malla radial, cuyos intervalos, se incrementan logarítmicamente desde el centro del pozo de bombeo hasta la frontera lateral. Los abatimientos son calculados en cada malla en la superficie freática ( $s_r$ ) y a una distancia de 0.25 del espesor saturado ( $s_b$ ), arriba de la base del acuífero. Los cálculos de los abatimientos, son realizados a intervalos de tiempo  $t+\Delta t$ . La aproximación de la diferencia finita de la ecuación 1, permite escribir las siguientes expresiones para los abatimientos a los tiempos  $t+\Delta t$ , los cuales dependen de los valores previos del abatimiento al tiempo  $t$ .

$$\left( \frac{s_{m+1} - s_m}{HU_n} + \frac{s_{m-1} - s_m}{HU_{n-1}} + \frac{s_{b,n} - s_m}{V_n} \right)_{t+\Delta t} = \frac{s_{m,t+\Delta t} - s_{m,t}}{T_n} + q r_n^2 \quad (2)$$

donde

- $r$  = ordenada radial (m)
- $t$  = tiempo (días)
- $\Delta t$  = intervalo de tiempo en el cual ocurre el abatimiento (días)
- $q$  = recarga por unidad de área ( $m^3/día$ )
- $s_{n-1}, s_n, s_{n+1}$  = abatimiento en los nodos  $n, n-1, n+1$
- $HU_n = HL_n$  = resistencia hidráulica radial en el nodo  $n$
- $V_n$  = resistencia hidráulica vertical en el nodo  $n$
- $T_n$  = relación tiempo/coeficiente de almacenamiento

El método de diferencias finitas conlleva a una serie de ecuaciones simultáneas, que son eficientemente resueltas por simples matrices. En la ecuación 2,  $q$  es la recarga por unidad de área. Otros términos incluidos en estas ecuaciones, están considerados como equivalentes a resistencia hidráulica de la siguiente forma:

- cambio de condiciones confinadas a libres.

Los modelos numéricos desarrollados por Rushton y Redshaw (1979) y por Rathod y Rushton (1984), resuelven la siguiente ecuación diferencial que describe el flujo radial de agua hacia un pozo, incluyendo componentes verticales de flujo (Jones y Rushton, 1981):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( bK_r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + \frac{b}{r} \left( K_r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + bK_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = S \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1)$$

donde

- $r$  = ordenada radial (m)
- $z$  = ordenada vertical (m)
- $b$  = espesor saturado (m)
- $K_r, K_z$  = conductividad hidráulica radial y vertical (m/s)
- $s$  = abatimiento (m)
- $S$  = coeficiente de almacenamiento

La discretización del campo de flujo radial hacia un pozo, se realiza por medio de una malla radial, cuyos intervalos, se incrementan logarítmicamente desde el centro del pozo de bombeo hasta la frontera lateral. Los abatimientos son calculados en cada malla en la superficie freática ( $s_r$ ) y a una distancia de 0.25 del espesor saturado ( $s_b$ ), arriba de la base del acuífero. Los cálculos de los abatimientos, son realizados a intervalos de tiempo  $t+\Delta t$ . La aproximación de la diferencia finita de la ecuación 1, permite escribir las siguientes expresiones para los abatimientos a los tiempos  $t+\Delta t$ , los cuales dependen de los valores previos del abatimiento al tiempo  $t$ .

$$\left( \frac{s_{n+1} - s_{n-1}}{HU_n} + \frac{s_{n-1} - s_n}{HU_{n-1}} + \frac{s_{bn} - s_n}{V_n} \right)_{t+\Delta t} = \frac{s_{n,t+\Delta t} - s_{n,t}}{T_n} + qr_n^2 \quad (2)$$

donde

- $r$  = ordenada radial (m)
- $t$  = tiempo (días)
- $\Delta t$  = intervalo de tiempo en el cual ocurre el abatimiento (días)
- $q$  = recarga por unidad de área ( $m^3/día$ )
- $s_{n-1}, s_n, s_{n+1}$  = abatimiento en los nodos  $n, n-1, n+1$
- $HU_n = HL_n$  = resistencia hidráulica radial en el nodo  $n$
- $V_n$  = resistencia hidráulica vertical en el nodo  $n$
- $T_n$  = relación tiempo/coeficiente de almacenamiento

El método de diferencias finitas conlleva a una serie de ecuaciones simultáneas, que son eficientemente resueltas por simples matrices. En la ecuación 2,  $q$  es la recarga por unidad de área. Otros términos incluidos en estas ecuaciones, están considerados como equivalentes a resistencia hidráulica de la siguiente forma:

$$HU_n = HL_n = \frac{2\Delta\alpha^2}{bK_r}; a = \log r$$

$$V_n = \frac{0.4875b}{K_r r^2}; T_n = \frac{\Delta t}{Sr^2}$$

donde

a = incremento logarítmico radial (m)

b = espesor saturado (m)

S = coeficiente de almacenamiento

Existe un gran número de condiciones hidrogeológicas que pueden afectar la dinámica del flujo del agua cuando un pozo es bombeado, entre otras, destacan las componentes verticales (de flujo) en la vecindad del pozo. Esta componente se puede establecer como en el caso de un acuífero confinado el cual es explotado por un pozo que sólo tiene rejilla en su parte inferior. Cuando el pozo está en un acuífero libre con tubería ranurada en su parte inferior, las componentes verticales son resultado del agua de respuesta del drenado retardado, como del agua que se desprende del almacenamiento del nivel superior de saturación. En el caso de un acuífero libre interconectado con un acuífero semiconfinado inferior a través de una capa semiconfinante de baja conductividad hidráulica vertical, en donde, el bombeo sólo se dirige al acuífero inferior; aquí los patrones de flujo son complejos, tanto para las componentes verticales como para las horizontales, en ambos acuíferos. El flujo es definitivamente vertical a través de la capa de baja conductividad hidráulica. En el caso de un sistema de dos acuíferos intercomunicados por capas semiconfinantes, en donde el pozo produce agua de cada uno de ellos, existe además una entrada adicional de agua de la superficie freática hacia el acuífero superior a través de la capa semiconfinante. Todos estos ejemplos muestran la importancia de las componentes horizontales y verticales de flujo, las que se deben considerar en todos aquellos casos donde las condiciones geológicas, e hidráulicas, así lo indiquen.

## 2. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La descripción de la geología del área está basada en los trabajos de Fred W. McDowell and Stephen (1979) y en Rodríguez (1970), así como en trabajos de campo que se llevaron a cabo para verificar los afloramientos de las diferentes unidades litológicas.

Cinco secciones geológicas fueron realizadas para evaluar la estratigrafía y familiarizarse con las características de las diferentes unidades litológicas.

### 2.1. Geología Regional

La zona estudiada se encuentra dentro de dos provincias fisiográficas: La Sierra Madre Occidental (SMO) y la Meseta Central (MC).

La primera se encuentra geológicamente caracterizada por dos grandes secuencias de rocas ígneas que forman una franja continua que bordea la parte occidental de México desde Arizona hasta su límite con la faja Volcánica Mexicana. La secuencia inferior de la SMO tiene edades entre 100 ma hasta los 45 ma, con abundantes rocas batolíticas y volcánicas de composición intermedia, principalmente. La secuencia superior tiene edades entre 34 ma y 27 ma y está formada a partir de grandes calderas, que están constituidas principalmente por ignimbritas, aunque se presentan también basaltos y escasas lavas intermedias.

La Meseta Central, es una zona de valles alargados con algunas sierras bajas orientadas de NW a SE, formadas por numerosos pilares y fosas tectónicas. Dichas fosas dislocaron los grandes afloramientos de rocas extrusivas ácidas, que se encuentran actualmente en su base, como por ejemplo en Villa de Reyes, San Luis Potosí, Villa de Arriaga, Ojuelos y El Obraje. Las fallas presentan desplazamientos promedios de 300 a 400 m, aunque evidencias geofísicas (Hernández *et. al*, 1990) indican que en algunas partes su desplazamiento total puede alcanzar hasta los 1,200 m. A este sistema de fosas pertenece a la fosa de Aguascalientes. Las edades de este fallamiento distensivo se considera Pos-Oligoceno.

En los pilares tectónicos de la Meseta Central, afloran rocas mesozoicas que se asocian a la Cuenca del Centro de México (Carrillo-Bravo, 1982) que en el Estado de Aguascalientes se encuentran representadas por una secuencia de rocas cretácicas de origen marino. Esta unidad está débilmente metamorfoseada y plegada, consisten en calizas de cuenca de estratificación mediana con intercalaciones de pedernal (Fm Cuesta del Cura). Estas rocas se encuentran cubiertas concordantemente por intercalaciones de calizas arcillosas de estratificación delgada con lutitas ligeramente metamorfoseadas que da origen a pizarras en la región (Fm Indidura). Dentro de la secuencia

también se han indentificado limolitas. Sobreyaciendo al paquete anterior se encuentra una secuencia de lutitas y areniscas de grano fino y de estratificación delgada (Fm Caracol).

Cubriendo a las rocas antes descritas se encuentran las potentes secuencias de vulcanismo ácido, correlacionables con el arco volcánico Oligo-Miocénico que formó la Sierra Madre Occidental. Al oriente de la ciudad de Aguascalientes aflora una sucesión de ignimbritas, tobas y piroclastos semiconsolidados, cuyo origen se asocia a una caldera que se encuentra al este de Tepezalá el cual permitió que la "ventana" de rocas cretácicas (calcáreas) que afloran en dicha región, quizá como resultado de los colapsos y explosiones ocurridas durante los eventos del citado centro eruptivo. Dicha secuencia se encuentra interdigitada en su parte superior con sedimentos de origen aluvial, asimismo, al sur del área de estudio, en el Cerro Los Gallos, se indentifica una caldera que se considera contemporánea a la de Tepezalá y pudo haber originado parte de las secuencias ignimbríticas identificadas en la porción sudoriental del área de estudio. La edad de las secuencia de tobas entre las que es posible distinguir una discordancia puede asignarse al Mioceno, lo cual se apoya en el hecho de que estas se encuentran afectadas por la falla oriental de la fosa de Aguascalientes.

El relleno del fosa de Aguascalientes, lo constituyen aluviones cuyo deposito debió ocurrir durante el Plioceno, Pleistoceno y Oligoceno. No se ha comprobado que las fallas de la fosa aún se encuentren activas (Aranda-Gómez, 1988)

TABLA 2.1

RELACIÓN ESTRATIGRÁFICA DE LAS FORMACIONES EN EL ESTADO DE AGS.

PERIODO	EPOCA	PISO	FORMACIÓN	LITOLÓGIA	ESP EST (m)
CUATERNARIO			SEDIMENTOS LACUSTRES Y ALUVIALES	ARENISCAS, ARENAS Y HORIZONTES DE ARCILLAS	
T E R C I A R I O	O L I G O C E N O	SUP			
		M	TOBA AGS.	TOBAS INT. CON MAT ALUVIALES	150
		G	MAT. ALUVIAL	SED. DESDE LIMOS A GRAVAS	250
		E	TOBA ZOYATAL	MAT. PIROCLÁSTICO < 4mm	350
		D	BRECHA VOLC.	FRAG. DESDE BLOQUES A LAPILLI	150
			RIOLIOTA	IGNIMBRITA	>300
C R E T A C I C O		INF			
		S	CONACIANO	CARACOL LUT. Y ARENISCAS	300
		U P E R I O R	TURONIANO	INDIDURA CZAS ARC. INT. CON LUT.	300
			ALBIANO-CENOMANIANO	CUESTA DEL CURA CZAS DE CUENCA ESTRATIFICADAS	220

## 2.2. Geología Local

Las rocas que afloran en el área de estudio son volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias. La distribución de estas rocas en unidades geocronológicas abarca del Oligoceno al Reciente.

En el área afloran dos tipos de rocas extrusivas: Ignimbritas y basaltos. Las primeras se encuentran ampliamente distribuidas en toda el área y prácticamente forman todas las elevaciones importantes. Los derrames basálticos forman afloramientos restringidos observándose en el área de Ojo Caliente y se consideran de poca importancia para los fines de éste trabajo. Megascópicamente las ignimbritas son generalmente de color rojizo a rosado de textura porfídica o afanítica y localmente eutaxítica; cuando presenta textura porfídica, se observan fenocristales de cuarzo en una matriz microcristalina. En el afloramiento de Ojo Caliente, la riolita presenta, en la parte inferior de su exposición una estructura fluidal y en la cima un aspecto masivo; en todo el afloramiento se aprecia un intenso fracturamiento.

Las ignimbritas cubren todas las rocas, desde las más antiguas, consideradas paleozoicas, hasta el conglomerado rojo de Zacatecas.

Una brecha volcánica sobreyace a la ignimbrita, macroscópicamente presenta color gris con tonalidades rosas, el tamaño de los fragmentos varía desde bloques hasta lapilli y están unidos por una matriz vítrea color crema con algunos tintes negros, el grado de redondez de los piroclastos va de anguloso a subanguloso, el espesor en el área es de 40m, se le asigna una edad del Terciario Medio.

En Lomas Zoyatal, en los arroyos El Cedazo y Paso Hondo así como en la presa El Cedazo, aflora una toba constituida por material piroclástico, cuyo tamaño de grano es menor a 4 mm, su color varía de marrón a amarillento y crema pálido. En muestra de mano su textura es terrosa, tiene baja densidad y solamente se aprecia el alto contenido de vidrio, sobreyace a la brecha volcánica descrita en el párrafo anterior y se le asigna una edad del Terciario Medio.

Se denomina Aluvión del Terciario a las secuencias de materiales sedimentarios que afloran en la porción sudoriental del área y que se encuentran ampliamente distribuidos en el subsuelo en la porción oriental. Esta unidad aflora en las llanuras al oriente del área; consiste en secuencias de sedimentos que varían en tamaño desde limos hasta gravas, se encuentran semiconsolidados y no consolidados aunque en algunas partes se encuentran cementados con carbonatos y óxidos. Por su posición estratigráfica se le asigna una edad del Mioceno Temprano.



Hernández (1991) dió el nombre de Toba Aguascalientes a una secuencia de tobas de color amarillo que varía a café con pseudoestratificación, interestratificada con materiales aluviales también semiconsolidados. Dentro de esta secuencia se encuentran lentes de ceniza blanca con espesores de 30cm a

Las unidades cuaternarias están constituidas por sedimentos lacustres y aluvión. Los sedimentos lacustres están constituidos por arenisca de grano fino a medio, de color verde olivo, no muy bien cementados; arenas de grano medio a grueso, horizontes escasos de arcilla y ocasionales lentes silíceos de color verde olivo. Estos materiales lacustres cubren discordantemente a la ignimbrita. El aluvión consta de clásticos mal clasificados y mal cementados e inclusive sueltos. Estos constituyen el relleno de la fosa de Aguascalientes, y forman parte del acuífero que se explota. Se considera que el aluvión tiene un espesor mínimo de 400m. De acuerdo a la información de algunos pozos profundos es posible encontrar la secuencia volcánica o las rocas sedimentarias con metamorfismo regional del Jurásico en la base del material sedimentario que rellena la fosa tectónica.

### 2.3. Tectónica

La Cuenca Mesozoica del Centro de México, esbozada originalmente como Cuenca Salinas-Ramos, es la unidad paleogeográfica que rige la tectónica del área. Contiene un enorme volumen de sedimentos marinos del Jurásico Superior y del Cretácico Inferior, Medio y Superior. Esquemáticamente, está limitada al oriente por la Plataforma Valles San Luis Potosí, al occidente por la Sierra Madre Occidental, al Norte por la Sierra Madre Oriental y al sur por el Eje Neovolcánico. Los plegamientos que la afectan fueron producidos por la Orogenia Laramide; son sensiblemente paralelos a la plataforma Valles San Luis Potosí, cerca de su borde oriental. Hacia el norte, las estructuras van adoptando un rumbo general NW-SE que culmina con la orientación francamente Este-Oeste, gobernada por la Península de Coahuila que actúa como unidad resistente.

La tectónica regional se refleja en las estructuras locales observándose que la mayoría tiene una orientación NW-SE y que en el límite Norte, las sierras cuyos alargamientos tienden a coincidir con los ejes estructurales se orientan con un rumbo aproximadamente Este-Oeste, siendo generalmente aislados de poca elevación por efectos erosivos y flanqueados por amplios valles de estructura sinclinal, a juzgar por las "ventanas" de sedimentos del Cretácico Superior Observadas.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Actividades de gabinete

Las acciones de conceptualización y cálculo se realizaron sobre los datos compilados y generados. La información se manejó con un enfoque multidisciplinario, tratando de responder preguntas que no eran posible resolver adecuadamente con el uso de los esquemas tradicionales de manejo de información hidrogeológica. Se analizó el área como un elemento dinámico en tres dimensiones, donde el movimiento del agua subterránea se efectúa en un medio geológico heterogéneo. El análisis se realizó con la integración de información geológica, geofísica e hidráulica subterránea del área. Esto dentro del marco teórico que sostiene la existencia de sistemas de flujo locales, intermedios y regionales. Enfoque que se reconoce como el adecuado para analizar zonas áridas y semiáridas con aguas subterráneas en rocas volcánicas fracturadas como es el caso de la Sierra Madre Occidental.

El manejo de la información consistió en las acciones principales siguientes:

(i) Selección análisis y procesamiento de información existente

(ii) Generación, análisis, procesamiento e interpretación de información específica.

(iii) La información geológica superficial se integró en una nueva interpretación con datos de subsuelo, para definir un marco físico de referencia en tres dimensiones por donde circula el agua subterránea.

(iv) Las características hidráulicas de las unidades hidroestratigráficas se determinaron con base en el análisis de pruebas de bombeo, con el uso de métodos (numéricos) computacionales (Rathod y Rushton, 1991).

#### 3.2 Descripción de las pruebas de campo

En pozos seleccionados en base a la información disponible (conocimiento del corte litológico y datos constructivos) se realizó una visita de inspección, para determinar si las instalaciones eran adecuadas para la realización de pruebas de bombeo. Debido a que se utilizaron instalaciones y equipos de bombeo dedicados a fines diferentes a los de las pruebas, no fué posible realizar la prueba con el gasto de extracción óptimo, adecuar distancia al pozo de observación, profundidad de los aprovechamientos, etc.

Las principales características del sitio que se buscaron fueron: i) facilidad para medir la profundidad al nivel del agua (utilizando una sonda eléctrica) en el pozo de bombeo o, en un mejor caso, en un pozo (de observación) cercano ii)

que los pozos visitados, conectados a la red de agua potable, tengan un medidor de flujo funcionando, para estar en condiciones de medir el caudal de extracción del pozo y *iii*) la disponibilidad del operador del pozo para permitir la realización de la prueba.

La mayor limitación que se encontró, fue que aproximadamente el 85% de los pozos visitados, no cuentan con medidor de flujo o está descompuesto.

Las pruebas de bombeo consistieron en observar la variación, con respecto al tiempo, de la profundidad al nivel dinámico en el pozo de bombeo y/o pozo de observación. Las mediciones de la profundidad al nivel dinámico se realizaron, de acuerdo con la práctica común, a tiempos cortos al inicio de la prueba (alrededor de 15 mediciones en la primera media hora), incrementando, posteriormente, el tiempo entre mediciones. Cuando fué posible, se registró también la etapa de recuperación del pozo, una vez que se dió por terminado el bombeo.

Como datos adicionales se registró, a intervalos regulares, la temperatura y la conductividad eléctrica del agua bombeada por el pozo; se tomaron muestras de agua para análisis de fluoruro. Esta información química permitió establecer variaciones en la calidad del agua bombeada con respecto al tiempo y fue de utilidad en la interpretación de las pruebas de bombeo

### 3.3. Secciones Geológicas

La integración del modelo geológico sirvió como referencia al modelo hidrogeológico conceptual. Este se realizó partiendo de la geología superficial y utilizando información de sondeos eléctricos verticales complementada con cortes litológicos y registros eléctricos de pozos profundos. A continuación se presenta una breve descripción de las secciones geológicas que se analizaron, transversales al valle de Aguascalientes, su ubicación aparece en la figura 3.1 y las secciones en la figura 3.2.

*Sección geológica 1.* En esta zona, existen otras secciones geofísicas, que no se consideraron por encontrarse diferencias marcadas en cuanto a la resistividad de las unidades geoelectricas y en la definición de su disposición en el subsuelo. Esta situación no permitió realizar una correlación adecuada entre todas las secciones geoelectricas disponibles, el máximo espesor del material de relleno de la fosa en el centro del valle es del orden de 500m. De acuerdo con su resistividad ( $\approx 10$  ohm-m), es posible suponer que se trata de sedimentos limo-arenosos y/o arcillo-arenosos. Hacia los márgenes de la fosa, las resistivades (20 a 45 ohm-m) indican arenas más gruesas y un menor contenido de arcilla. De acuerdo con la información del pozo de 900m de profundidad, el material granular sobreyace a rocas volcánicas fracturadas que se pueden correlacionar con las unidades que afloran en el límite sur con el estado de Jalisco (cerro de los Gallos).

*Sección geológica 2.-* En este caso no se incluyó información de sondeos eléctricos verticales. El espesor del material de relleno de la fosa es de 500m, igual al detectado en la sección geológica 1. En este caso fue posible inferir la disposición de un mayor número de estructuras (fallas normales) en el subsuelo. La presencia del material más arcilloso se definió con información de registros eléctricos.

Hacia el oriente del valle de Aguascalientes, en la zona de Ojo Caliente, las unidades volcánicas casi afloran. El espesor máximo inferido para el material arcillo-arenoso intercalado con tobas (Zoyatal y Aguascalientes), y que sobreyace a las rocas volcánicas, es de 350m, y disminuye hacia el oriente. El espesor máximo para la secuencia volcánica no se conoce con precisión, pero en el pozo el Tildio se cortaron alrededor de 600m de esta unidad sin llegar a la base.

Hacia el occidente del valle, la sección intercepta un afloramiento de las rocas más antiguas del estado, el Complejo Basal (Aranda-Gómez, 1989). La información disponible no es muy clara en la definición del tipo de estructura que separa las rocas del Jurásico y la secuencia volcánica del Terciario. En este caso se infirió un contacto tectónico (falla de tipo normal), como superficie de separación entre estas unidades. La información de tres pozos indica la existencia de un delgado espesor de material granular que sobreyace a la unidad volcánica.

La información geológica superficial de la zona de Calvillo, indica nuevamente la existencia de una fosa tectónica, de similar dirección a la del el valle de Aguascalientes. Los materiales que componen la fosa de Calvillo son tobas y material arcillo-arenoso, predominantemente. Debido a que la dirección del río Calvillo es muy similar a los lineamientos que limitan la fosa, se infiere que esta corriente está emplazada sobre una falla de tipo normal, tal y como se ejemplifica en esta sección. A diferencia del valle de Aguascalientes, la disposición del material que aflora en el interior de la fosa de Calvillo, permite suponer que actualmente es afectada por un proceso de erosión, debido a cambios en el nivel base (de erosión) local.

*Sección geológica 3.-* Esta atraviesa el valle de Aguascalientes, aproximadamente en la ciudad de Jesús María. La elaboración de esta sección geológica utilizó datos de la sección geoelectrica I de Consultores (1981) y dos sondeos eléctricos verticales de ETEISA (1990). La correlación geológico-geofísica, se basó en la geología superficial y la información de cinco pozos profundos.

El material granular sobreyace a la unidad de rocas volcánicas, pues los pozos Posta Zootécnica y Jesús María 2 cortaron esta unidad a profundidad; además, la resistividad que prevalece en la sección ( $\approx 500-600$  ohm-m), así lo corrobora. En la zona oriente de la sección, las resistividades ( $\approx 10$  ohm-m) y la geología superficial, permiten suponer que corresponde a la unidad tobas y material arcillo-arenoso.

*Sección geológica 4.-* El material granular de la fosa de Aguascalientes, presenta resistividades (50-100 ohm-m) que indican que se trata de arenas con poca cantidad de arcilla, y un espesor inferido con base en los datos geofísicos de 600-700m. Se detectó una zona superior arcillosa, con resistividades de 10 ohm-m y espesor variable (200-100m).

El límite oriental de la fosa de Aguascalientes definido en esta sección, es diferente al encontrado en secciones previas, pues se tiene un pilar tectónico que conforma la Sierra de Tepezalá, con rocas calcáreas del Cretácico. El pozo Clavellinas de 300m de profundidad, cortó este tipo de unidad en toda su profundidad, misma que no se cortó en el pozo el Polvo, por lo que se infiere la presencia de una falla normal como el origen del flanco oriental de este pilar tectónico.

La fosa tectónica en la porción oriental de la sección está constituida por material granular arenoso, que sobreyace a las rocas sedimentarias que se encontraron en el pozo Villa Juárez. Esta fosa corresponde al valle del Chicalote.

*Sección geológica 5.-* Es una sección muy similar a la número 4, pues el flanco oriental de la fosa de Aguascalientes está constituido por las rocas calcáreas de la sierra de Tepezalá. El espesor del material de rolleno en el valle de Aguascalientes, no fué posible inferirlo pero por analogía con secciones anteriores, se estima del orden de 500m. De acuerdo con información geofísica, la porción superior del material de relleno se interpreta como arcillo-arenosa, a diferencia de la zona inferior, cuyos valores denotan material arenoso.

No se tiene mucha información de pozos profundos en esta sección, únicamente se cuenta con datos de dos pozos, por lo que la correlación geológico-geofísica se basó principalmente en las tendencias encontradas en las secciones analizadas previamente. El espesor del material granular en la fosa tectónica ubicada en la zona oriental de la sección, se determinó con exactitud, ya que se obtuvo de datos del pozo Ciénega Grande. Este material de relleno sobreyace a rocas volcánicas en esta zona, condición diferente a la Sección geológica 4, donde se tienen rocas sedimentarias.

### **3.4 Unidades Acuíferas**

El agua subterránea en la región de estudio se mueve en dos medios básicos, granular (Tt y Tgi) y en el fracturado (Tr). Consideradas como unidad superior y unidad inferior respectivamente. Debido a que no se infirió ningún estrato continuo de material arcilloso el acuífero hidrologicamente es libre.

FIG 3.1 UBICACIÓN DE LAS SECCIONES GEOLÓGICAS

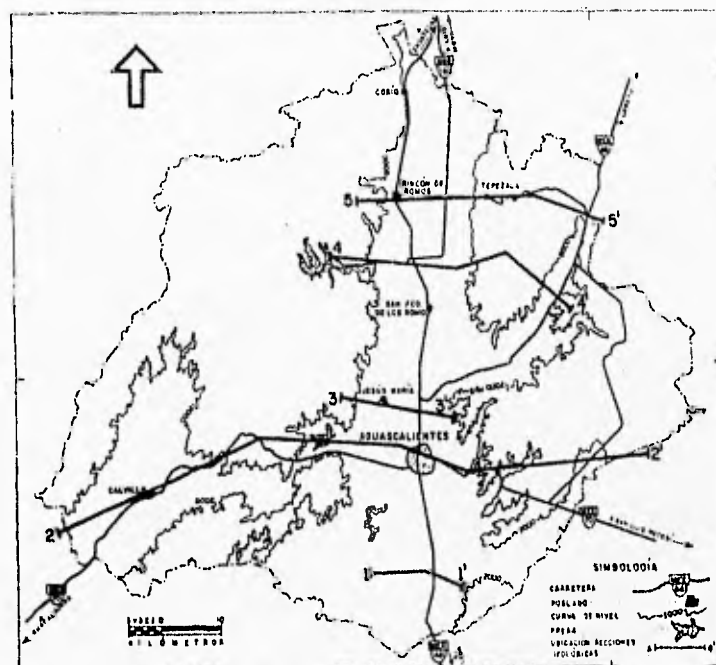
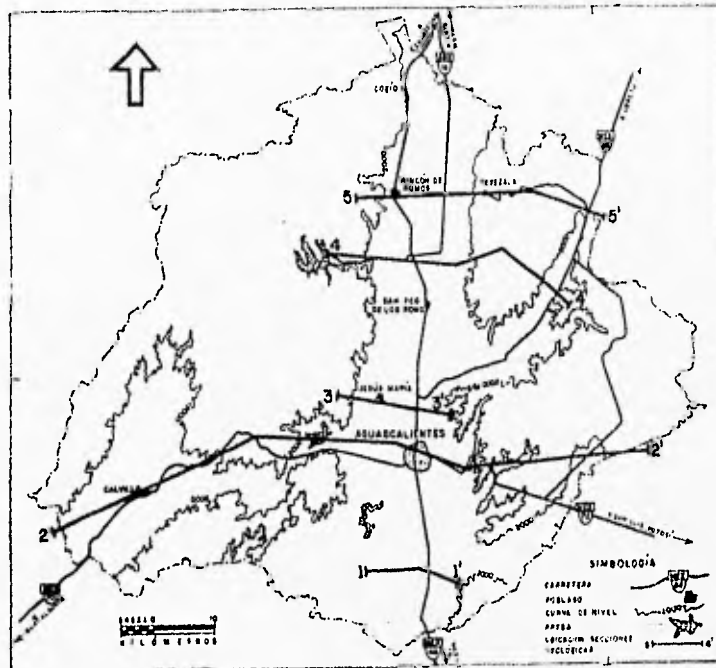
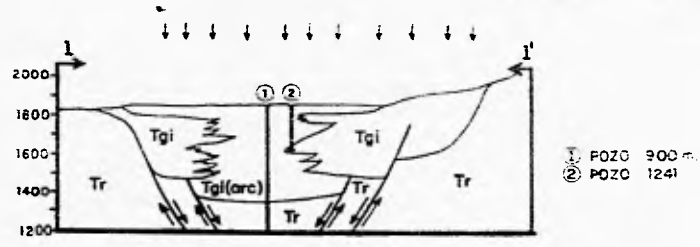


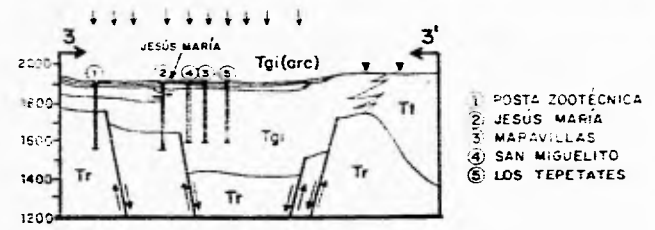
FIG 3.1 UBICACIÓN DE LAS SECCIONES GEOLÓGICAS





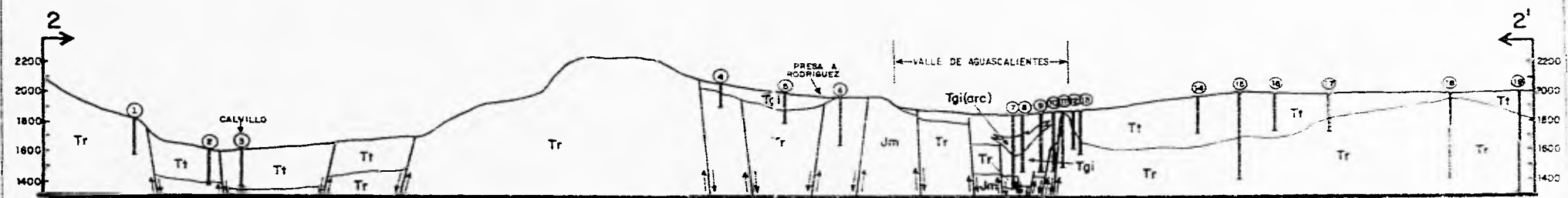


SECCIÓN GEOLÓGICA 1



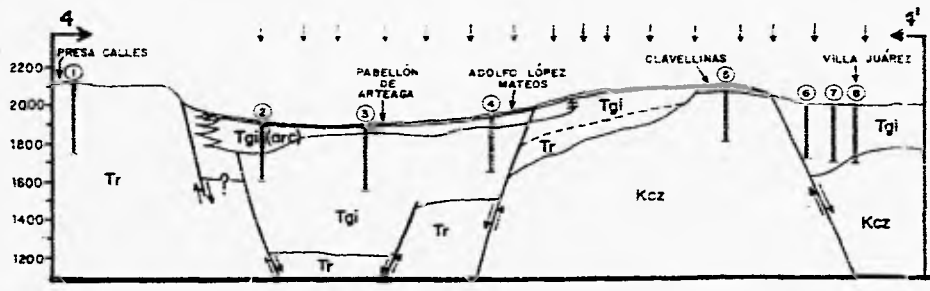
SECCIÓN GEOLÓGICA 3

- 1 POSTA ZOOTÉCNICA
- 2 JESUS MARÍA
- 3 MAPAVILLAS
- 4 SAN MIGUELITO
- 5 LOS TEPETATES



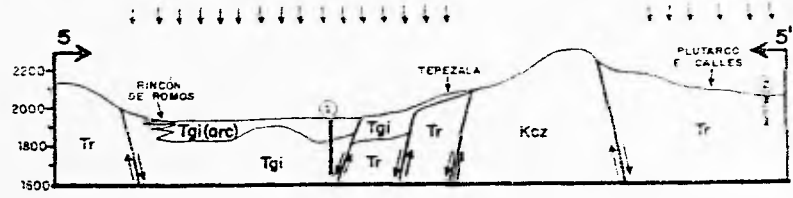
SECCIÓN GEOLÓGICA 2

- 1 PRESA SERNA
- 2 LOS PATOS
- 3 CALVILLO
- 4 PEDERNAL PRIMERO
- 5 IGNACIO ZARAGOZA
- 6 CIENEGUITA
- 7 CA-66
- 8 CA-27
- 9 CA-40
- 10 CA-3
- 11 CA-59
- 12 CA-95
- 13 CA-132
- 14 PASO MONDO
- 15 EL RETORNO
- 16 SAN JERÓNIMO
- 17 SANDOVALES
- 18 EL TILDÍO
- 19 MONTOYA



SECCIÓN GEOLÓGICA 4

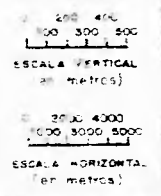
- 1 SAN JOSÉ DE GRACIA
- 2 SANTIAGO
- 3 PABELLÓN DE ARTEAGA
- 4 ADOLFO LÓPEZ MATEOS
- 5 CLAVELLINAS
- 6 EL POLVO
- 7 SAN JOSÉ DEL RÍO
- 8 VILLA JUÁREZ



SECCIÓN GEOLÓGICA 5

- 1 LA VICTORIA
- 2 CIENEGA GRANDE

Tt Terciario. Tobas y sedimentos elásticos arcillo-arenosos  
 Tgi(arc) Terciario granular indiferenciado (arcillas)  
 Tgi Terciario granular indiferenciado (arenas y arcillas)  
 Tr Riolita, ignimbrita, tobas y brechas volcánicas del Terciario Medio  
 Kcz Intercalación de calizas arcillosas y areniscas con bandas de pedernal  
 Jm Complejo basáltico. Rocas metamórficas  
 ↓ Sondeo eléctrico consultores  
 ▽ Sondeo eléctrico ETEISA



#### 4. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

##### 4.1. Implementación del modelo numérico

###### 4.1.1 Parámetros del modelo

Las condiciones a resolver por una prueba de bombeo pueden incluir acuíferos tanto libres, semiconfinados, confinados y multicapa. Para obtener las características hidráulicas el modelo numérico consiste de cuatro zonas, o capas horizontales. Cada una de ellas es designada de la manera siguiente:

verticalmente, hacia abajo, desde el nivel estático y se definen como sigue:

	Modelo	Ags.
techo de la arcilla semipermeable superior	= TARS	
techo del acuífero superior	= ARSTACS	ARSTACS
base del acuífero superior	= BACS	BACS
techo del acuífero inferior	= TACI	
profundidad a roca basal	= BIMP	BIMP

Es importante definir las condiciones para el pozo, en su pared y vecindad del mismo. El pozo puede extraer agua tanto del acuífero superior o del inferior, o de ambos. Cuando el agua es obtenida de los acuíferos, el abatimiento en la pared del pozo es el mismo para cada acuífero con una transferencia libre vertical dentro del mismo. En la vecindad del pozo, hacia la pared del mismo, hay a menudo una pérdida de carga rápida de la superficie potenciométrica que se denomina pérdida de pozo. Esta es, realmente, consecuencia de cambios en la conductividad hidráulica, debidos a las actividades de perforación y construcción del pozo. Las pérdidas de pozo están representadas en el modelo por un cambio en la conductividad hidráulica en la celda cercana al mismo.

Cada unidad será caracterizado con valores para los parámetros correspondientes, dichos valores pueden variar en forma radial desde el pozo. Las variables necesarias son: el espesor, conductividad hidráulica vertical y horizontal, coeficiente de almacenamiento en condiciones de confinamiento y libre. Las capas semipermeables necesitan únicamente los valores de su conductividad hidráulica vertical, pues debido a su naturaleza, el flujo a través de éstas capas es preferentemente vertical. Esto implica que las conductividades hidráulicas verticales de éstas deberán ser, cuando menos, dos órdenes de magnitud mas pequeñas que las conductividades hidráulicas horizontales de los acuíferos.

El coeficiente de almacenamiento de las capas confinantes no está representado directamente, pues para la mayor parte de los problemas de agua subterránea y la duración (varios días) de las pruebas de bombeo convencionales, el efecto de su almacenamiento puede ser despreciado.

Es importante hacer notar que cuando existan condiciones geológicas especiales, por ejemplo cuando esté presente un acuitardo, se debe considerar el valor real del coeficiente de almacenamiento de dicha capa, de lo contrario se puede incurrir en errores graves.

Las condiciones hidráulicas en el acuífero superior son automáticamente consideradas por el modelo, en especial cuando éstas cambian de confinadas a libres. Esto es, cuando el abatimiento producto del bombeo está por debajo de la capa confinante. En el caso de condiciones libres se incorpora el índice de rendimiento retardado (alfa) en forma de un coeficiente de almacenamiento efectivo, el cual es igual al coeficiente de almacenamiento confinado al comenzar la prueba, valor que se incrementa hasta la porosidad efectiva ( $S_y$  rendimiento específico) en tiempos largos. A este valor se adiciona una recarga efectiva que representa el drenaje retardado. En consecuencia la información que se debe incluir en el modelo es tanto la porosidad efectiva como el coeficiente de almacenamiento, valores que pueden ser diferentes en forma radial al pozo. Es posible incluir la recarga a un acuífero libre en el modelo.

Este modelo puede ser usado para representar tanto acuíferos confinados como libres y/o semiconfinados, así como la presencia de cualquier combinación de ellos; también permite considerar el caso de la penetración parcial de un acuífero y simular el bombeo de un pozo el cual sólo recibe agua de la parte superior o inferior. Uno de los conceptos que es fundamentalmente enfatizado es la naturaleza tridimensional del flujo del agua subterránea. Consecuentemente, la componente vertical de flujo tanto en un acuífero y/o en las capas confinantes debe ser considerado. Inevitablemente, el flujo del agua en el pozo sujeto a bombeo incrementa la presencia de flujo vertical.

Considerando lo establecido anteriormente, cuando es necesario determinar la conductividad hidráulica de un medio fracturado, se deberá conocer el espesor productor de la unidad geológica de interés. Esto es, el modelo considera el espesor incluido como la sección acuífera productora real, por ejemplo si un pozo atraviesa 100 m de una roca ríolítica, donde la sección fracturada se encuentra entre los 50 y los 65 m, éste será el espesor productor máximo a considerar. (La implementación de las pruebas de bombeo simuladas a caudal constante se presenta en el anexo 1). Los valores de las características hidráulicas resultantes de la interpretación de las pruebas de bombeo se muestran en la tabla 5.1.

## 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Características hidráulicas

Los resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo disponibles a gasto constante confirman: *i)* que puede existir un flujo regional establecido por el comportamiento hidráulico de los pozos, *ii)* que los pozos tienen pérdidas de carga importantes y *iii)* que la entrada de agua a los pozos está controlada por la geología particular de cada sitio.

El flujo regional fue identificado en las pruebas por la variación mínima del abatimiento con el tiempo de bombeo. La respuesta natural de un sistema sin este flujo y con un aporte (exclusivamente) horizontal es la de abatirse con el tiempo de bombeo. La entrada de agua como flujo vertical, incluye volúmenes adicionales que disminuyen notablemente los abatimientos teóricos esperados. Sin embargo, la naturaleza fracturada del medio que implica elevada permeabilidad puede controlar la respuesta mínima de abatimiento.

El modelo utilizado permite la definición de las pérdidas de carga en el pozo por ineficiencias en la perforación, diseño, construcción, desarrollo y operación del mismo. Las determinaciones de los parámetros hidráulicos permitieron identificar una reducción en la eficiencia de entrada de agua al pozo en un factor del orden de diez. Esto implica que la permeabilidad entre la cara interior del pozo, el filtro de grava y la parte vecina del acuífero ha sido reducida drásticamente en una selección igual a este factor, a consecuencia de las acciones arriba indicadas.

La simulación numérica de las pruebas de bombeo permitió definir que la entrada de agua a los pozos está controlada por la geología particular de cada sitio. Específicamente, lo anterior se definió debido a: *i)* el espesor efectivo del acuífero es menor al real debido a que se tiene aporte por fracturas, *ii)* la entrada más importante de agua al pozo es por fracturas verticales con una conductividad hidráulica, de hasta dos órdenes de magnitud mayor que la horizontal y *iii)* la unidad con más potencial de producción es la roca riolítica (medio fracturado), en especial cuando se le compara con el material granular (medio poroso).

TABLA 5.1

*Propiedades hidráulicas de las unidades hidroestratigráficas*

Pozo	Q (m <sup>3</sup> /d)	R <sub>p</sub> (m)	K <sub>h</sub> (m/d)	K <sub>v</sub> (m/d)	b (l)	S <sub>c</sub>	S <sub>y</sub>	P <sub>p</sub>	medio
Morelos 4	3,374.8	0.158	50.0	68.0	22.0	0.0008	0.01	11.1	Ignimbrita
Morelos 5	3,939.8	0.165	1.2	100.0	204.0	0.0001	0.01	10.0	Ignimbrita
Morelos 6	1,987.2	0.160	1.2	100.0	341.0	0.0001	0.01	12.0	Ignimbrita
IVCentenario	9504.0	0.18	100.0	100.0	220.0	0.0008	0.01	11.0	Ignimbrita
Cumbres	2851.2	0.18	3.0	50.0	189.0	0.0006	0.01	11.0	Ignimbrita
F. Ojo C.	260.1	0.18	68.0	100.0	223.0	0.0001	0.01	11.0	Ignimbrita
SAUCILLO	475.2	0.15	20.0	0.5	168.0	0.0007	0.10	0.0	Granular
ALAMITOS	388.8	0.152	2.0	0.15	105.0	0.0005	0.20	11.0	Granular
FRESNILLO	604.8	0.15	11.0	0.2	5.0	0.0007	0.02	4.0	Granular
POLVO	581.6	0.15	0.5	0.05	145.0	0.0005	0.10	9.0	Granular
CLAVELINAS	302.4	0.15	0.042	0.01	227.0	0.001	0.15	8.0	Caliza
ÁGUILA	475.2	0.15	1.8	0.1	125.0	0.0008	0.10	11.0	Granular
CALDERA	648.0	0.15	4.5	0.01	135.0	0.0008	0.30	10.0	Granular
LA PUNTA	345.6	0.15	0.033	100.0	170.0	0.004	0.08	9.0	Ignimbrita

Q, caudal de extracción  
R<sub>p</sub>, radio efectivo de pozo

K<sub>v</sub>, conduct. hidráulica vertical  
K<sub>h</sub>, conduct. hidráulica horizontal  
S<sub>c</sub>, coeficiente almacenamiento

S<sub>y</sub>, porosidad efectiva  
P<sub>p</sub>, pérdidas en pozo  
b, espesor

En particular los pozos Cumbres, Ojo Caliente, IV Centenario y los Morelos 4, 5 y 6 se encuentran extrayendo agua exclusivamente de medio fracturado, lo que se evidencia por un abatimiento mínimo producido por el caudal extraído que es menor a un metro en los pozos Morelos 4, Morelos 6, IV Centenario y menor a 14 metros en los pozos Cumbres y Ojo Caliente, los acuíferos penetrados por estos pozos manifiestan la condición de semiconfinamiento impuesta por las arcillas y arenas del Terciario que los sobreyacen. La modelación de los datos de campo indicó que la conductividad hidráulica tiene valores que se incrementan radialmente desde la vecindad del pozo. Los valores altos de  $K_v$  en estos pozos indican que el material (ignimbrita) tiene fracturas (verticales) de amplia extensión en la vecindad del pozo como consecuencia del tectonismo existente en la región. La comparación de los valores de la conductividad hidráulica vertical con los valores de la conductividad hidráulica horizontal, indican que la componente vertical de flujo es en dos órdenes más importante que la horizontal, esto es, el agua subterránea que se explota en estos pozos tiene un aporte pobre de flujo horizontal. La interpretación de los resultados de la prueba en los pozos Morelos 4 y IV Centenario ( $K_h \approx K_v$ ), sugiere que el medio puede comportarse localmente como de doble porosidad. La porosidad efectiva tiene valores congruentes con este tipo de material ( $S_y < 0.01$ ), pues el almacenamiento es en las fracturas. En lo correspondiente a las pérdidas de carga por deficiencias constructivas y operativas del pozo, éstas son de entre nueve y doce lo que indica que los abatimientos son producidos en su mayor parte por estas deficiencias, es decir, la conductividad hidráulica en la vecindad del pozo disminuye en proporción a las pérdidas.

En lo correspondiente a los pozos que extraen agua del medio granular, excepto el Clavelinas que está en calizas arcillosas intercaladas con lutitas, las conductividades hidráulicas horizontales son relativamente mayores a las verticales ( $K_h > K_v$ ) como es de esperarse en un medio granular sedimentario. Las pérdidas de carga en estos pozos, indican que las deficiencias arriba indicadas también son aplicables a estos pozos.

Al igual que los acuíferos en medio fracturado, los acuíferos en medio granular manifiestan condiciones de semiconfinamiento impuesta por la presencia de sedimentos arcillo-arenosos, los cuales se encuentran intercalados o sobreyacentes.

El coeficiente de almacenamiento tiene valores que oscilan entre 0.0007 y 0.004. Estos valores son congruentes con el tipo de acuíferos (acuíferos semiconfinados) e indican que se requieren variaciones muy fuertes de la carga hidráulica en grandes áreas para producir rendimientos significativos de agua.

La porosidad efectiva para el medio granular es de 0.03 a 0.20, valores que de acuerdo con los rangos de conductividad hidráulica (bajos) indican que los pozos explotan unidades que tienen arcillas y material fino.

La corta duración de las pruebas de bombeo no permitió definir el comportamiento regional de las unidades hidroestratigráficas en ambos materiales así como tampoco la presencia de barreras hidráulicas. La representación gráfica de las pruebas de bombeo, así como la localización y corte litológico del pozo se presentan en el anexo 1.

## 6. CONCLUSIONES

El modelo hidrogeológico del estado de Aguascalientes, está representado por un acuífero integrado por dos unidades, una superior, (granular) y otra inferior, (fracturada). Ambas unidades mantienen continuidad hidráulica a través de flujo vertical ascendente en el valle de Aguascalientes.

Las unidades geológicas que integran la parte superior del acuífero superior son : a) sedimentos aluvio-lacustres del cuaternario, b) material arcillo-arenoso intercalado con tobas (Zoyatal y Aguascalientes), dentro de estas unidades la condición de semiconfinamiento es impuesta por la presencia de arcillas y material arcillo-arenoso. La parte inferior del acuífero está formado por rocas volcánicas fracturadas cuyo espesor máximo no se conoce con precisión, pero en el pozo el Tildio se perforaron alrededor de 600m de esta unidad sin llegar a la base.

La conductividad hidráulica para la secuencia de rocas de origen marino perforada en el pozo Clavellinas  $4.8 \times 10^{-7}$  m/s, la cual está acorde con la indicada por Davis (1969) para rocas calizas no fracturadas indica que esta caliza marina no es fuente significativa de agua subterránea.

Una de las características más importantes de la conductividad hidráulica en rocas cristalinas ígneas y metamórficas es que los valores de la Kv decrecen con la profundidad. Esto, de acuerdo con Davis and D Wiest (1966), la figura 6.1 muestra el diagrama esquemático de Kv contra la profundidad relacionada con la riolita del Terciario Medio, donde la Kv tienden a decrecer con la profundidad, pero en general se mantiene constante. Las rocas son menos permeables a mayor profundidad porque la variación de esfuerzos que causan las fracturas ocurren más frecuentemente cerca de la superficie. Sin embargo la permeabilidad producida por fracturas puede existir a grandes profundidades.

El rango de valores de la conductividad hidráulica obtenidos de pruebas de bombeo, son congruentes con la naturaleza de los medios porosos en la parte superior del acuífero.

Apoyados en los resultados de los pozos Ojo Caliente y IV Centenario, se espera que el rendimiento de los pozos sea más alto en los valles que cerca de las zonas con mayor altitud, ya que los valles se desarrollan a lo largo de zonas de fallas. La tendencia para zonas de fallas a tener una alta permeabilidad es un factor primario en la relación de pozo-rendimiento.

El modelo numérico aplicado para evaluar las pruebas de bombeo permitió obtener valores confiables del rendimiento específico ( $S_y$ ) y coeficiente de almacenamiento ( $S_c$ ), sin información de pozos de observación. situación que se presentó en todos los pozos, excepto en el pozo Saucillo.

#### RECOMENDACIONES

El nivel de agua observado en un pozo es una expresión de la carga hidráulica en el acuífero en la fase del pozo, y lo es también como función de la densidad promedio de la columna de agua en el pozo. Por lo tanto los niveles de agua observados en una prueba se pueden usar directamente para calcular el abatimiento hidráulico en el acuífero sólo si la densidad promedio de la columna de agua permanece constante. Ésta depende del perfil de temperatura en la columna.

En un pozo este perfil cambia con el tiempo, por lo que una corrección por efecto de la temperatura se requiere en los cálculos de abatimiento.

Es también importante definir en estudios futuros el control particular de la recarga natural en las zonas montañosas para correcciones en la sección hidrogeológica subterránea de la región.



FIG 6.1 DIAGRAMA ESQUEMATICO DE Kv vs PROFUNDIDAD RELACIONADA  
 CON LA RIOLITA DEL TERCARIO MEDIO

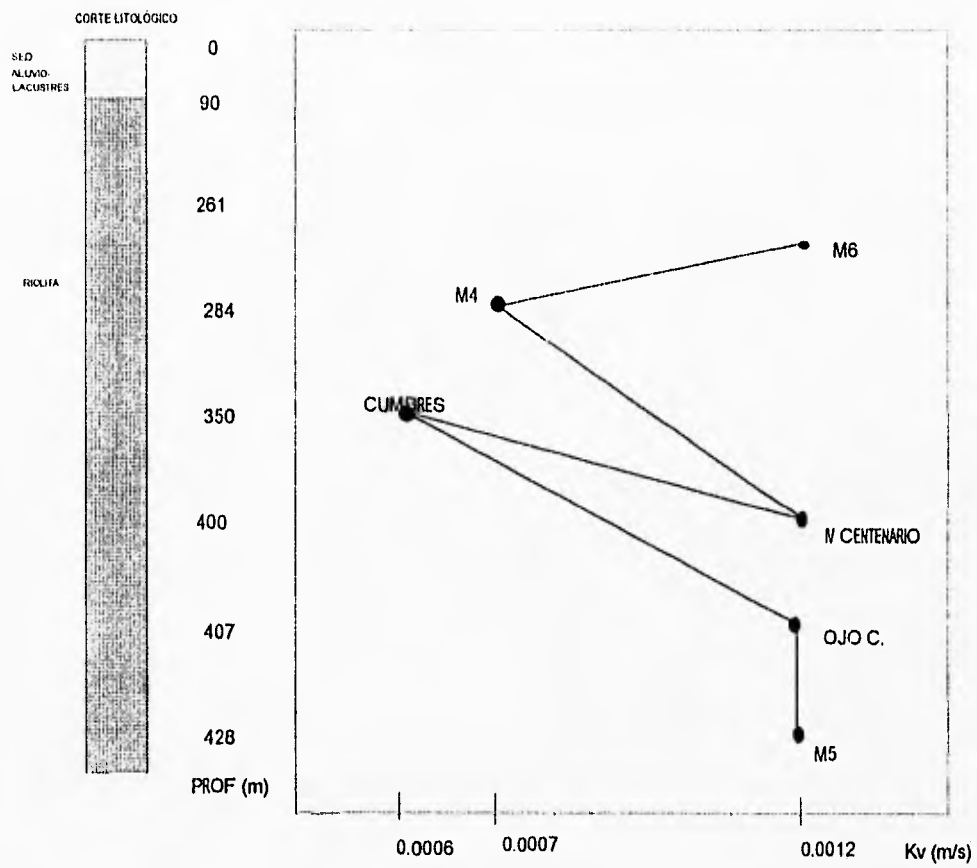
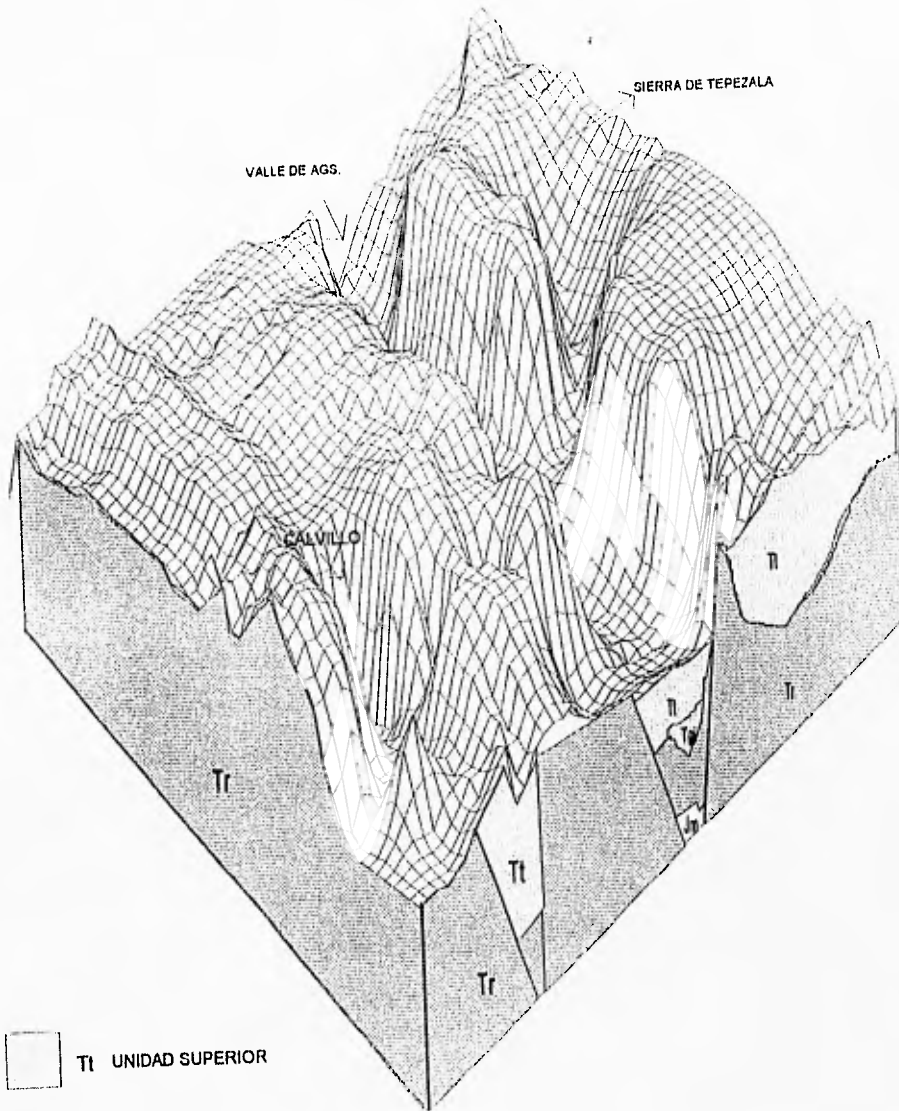


DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL ACUÍFERO DE AGS.



Tt UNIDAD SUPERIOR

Tr UNIDAD INFERIOR

Jm

## REFERENCIAS

- Aranda-Gomez, J.J., 1988. Geología preliminar del graben de Aguascalientes. *Revista del Instituto de Geología-UNAM*. v.8, No. 1, 22-32.
- Cardona A., 1990. Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea del valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León. 97 pp.
- Cardona A. y Carrillo-Rivera, J.J., 1991. Estimación de la profundidad mínima de circulación para sistemas de flujo regional en cuencas volcánicas Terciarias. °En: S.P. Verma, J.A. Ramírez, C.O. Rodríguez, J.M. Barbarin, G. Izquierdo, M.A. Armienta y D.J. Terrell (Eds.) *Actas Fac. Ciencias Tierra UANL Linares N.L.*, v.6, 71-75.
- Cardona A., Carrillo-Rivera, J.J. y Armienta M.A., 1993. Elementos Traza: Contaminación y valores de fondo en aguas subterráneas de San Luis Potosí, S.L.P. México. *Geof. Int.*, v.32(2), 277-286.
- Cardona, A., y Hernández, N. 1995. Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el valle de México. *Ingeniería Hidráulica en México*, v.32, sept.-dic., 71-90.
- Carrillo-Rivera, J.J., 1992. The hydrogeology of the San Luis Potosi area, Mexico. Thesis of Doctor of Philosophy. University of London. 175 pp.
- Carrillo-Rivera J.J., Clark, I. and Fritz, P., 1992. Isotopic, chemical and Thermal character of groundwater resources in Villa de Reyes, S.L.P., Mexico. *Applied Hydrogeology*, v.4, 35-48.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., Duncan, M., 1996. Importance of the vertical component of groundwater flow: A hydrogeochemical approach in the valley of San Luis Potosí, Mexico. Aceptado para su publicación en el *Journal of Hydrology*.
- De la Cruz, R.S., Espíndola, C. J.M. y Medina M.M., 1980. Consideraciones acerca del flujo de calor terrestre. *Ciencia*, v.31. 201-231.
- Davis, S.N and De Wiest, R.J.M., 1966, *Hydrogeology*, John Wiley and sons, Inc., London, G.B, 463 pp.
- Engelen, G.B. 1986. Water systems, methodology and definitions. In *Developments in the analysis of groundwater flow systems*, edites by G.B. Enelen and J.P. Jones, published by the International Association of Hydrological sciences, IAHS publication No.63, 67-107.
- ETEISA, 1990. Estudio geohidrológico del valle de Aguascalientes localidad ojo caliente y sureste de la cd. de Aguascalientes, 136p.

- Freeze, R.A., and Cherry, J., 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Freeze, R.A., and Witherspoon, P.A., 1967. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water table configuration and subsurface permeability variation. *Water Resources Research*, v.2, No.2, 623-634.
- Hantush, M.S and Jacob, C.E., 1955. Non-Steady Radial Flow in an Infinite Leaky Aquife, *Trans. Am Geophys.*
- Hernández, L. N., 1991. Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del sistema acuifero del valle de León, Guanajuato. Tesis para obtener el título de Ingeniero geólogo. Fac. Ing. UNAM. 129p.
- IGf, Instituto de Geofísica, 1988. Estudio Geofísico-geohidrológico del valle de San Luis Potosí. Contrato cc-86-3140 realizado para la Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica de la SARH, 127 pp.
- Igf, Instituto de Geofísica, 1994. Definición del flujo regional de agua subterránea, su potencialidad y uso en la zona de la ciudad de Aguascalientes, Ags. Fase I, Estudio Local. (Informe de avance).
- INEGI, Inst. Nac. Est. Geog. Inf., 1993. Estudio hidrológico del Estado de Aguascalientes, 164p.
- Ophori, D.U., and Tóth, J., 1989. Characterization of ground-water flow by field mapping and numerical simulation, Ross Creek Basin, Alberta, Canada. *Groundwater*, v.27. 193-201.
- Raisz, E., 1964. *Landforms of México*. Cambrige, Mass., Second Edition, mapa con texto, escala aproximada 1:3 000 000.
- Rushton K.r and Redshaw S.C, 1979. *Seepage and groundwater flow*. John Wiley and Sons. Great Britain, 339 pp.
- Rathod S. and Rushton K.R., 1984. Numerical method of pumping test analysis using microcomputer. *Groundwater*. Vol. 22.No 5, pp. 601-608
- Robertson, F.N., 1986. Occurrence and solubility controls of trace elements in groundwater in alluvial basins. regional aquifer systems in the USA, *Amer. Water Res. Asoc.* 69-80.
- Tristán, G.M., 1986. Estratigrafía y tectónica del graben de Villa de Reyes, en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, México. *Inst. Geol. UASLP, Foll. Tec.* 107.

## **FIGURAS Y TABLAS**

FIG. 1.3 Localización del área de estudio 4

FIG. 1.4 Relación del estado de Ags. Con las provincias fisiográficas 6

FIG. 3.1 Ubicación de las secciones geológicas 22

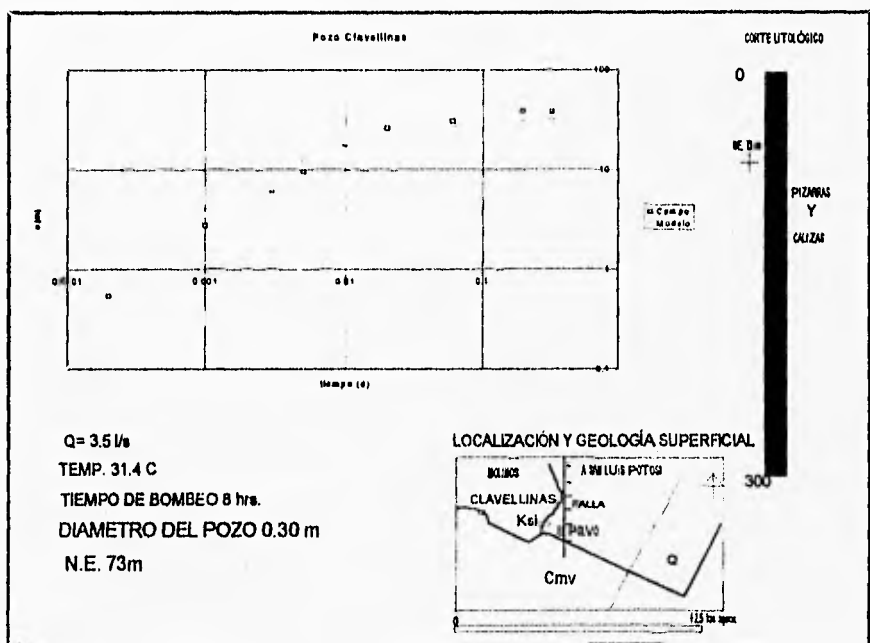
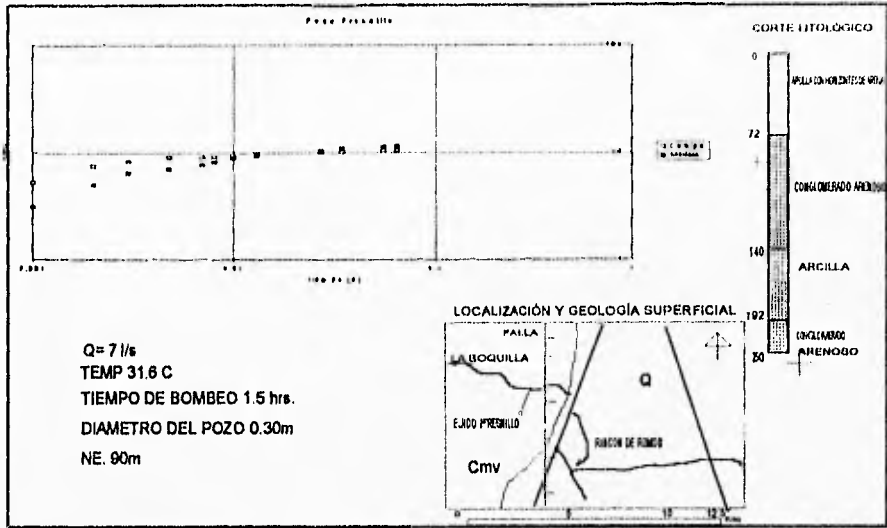
FIG. 6.1 Relación de la conductividad hidráulica con la profundidad 29

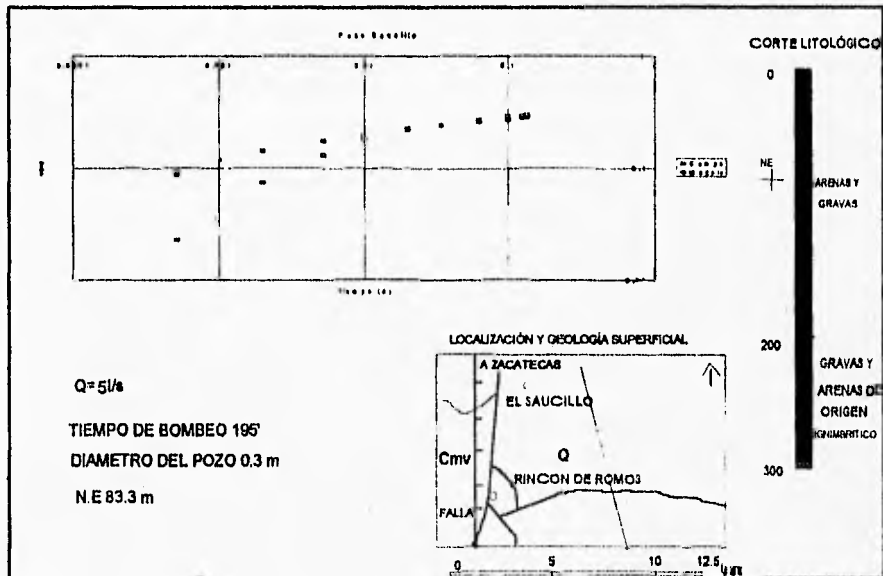
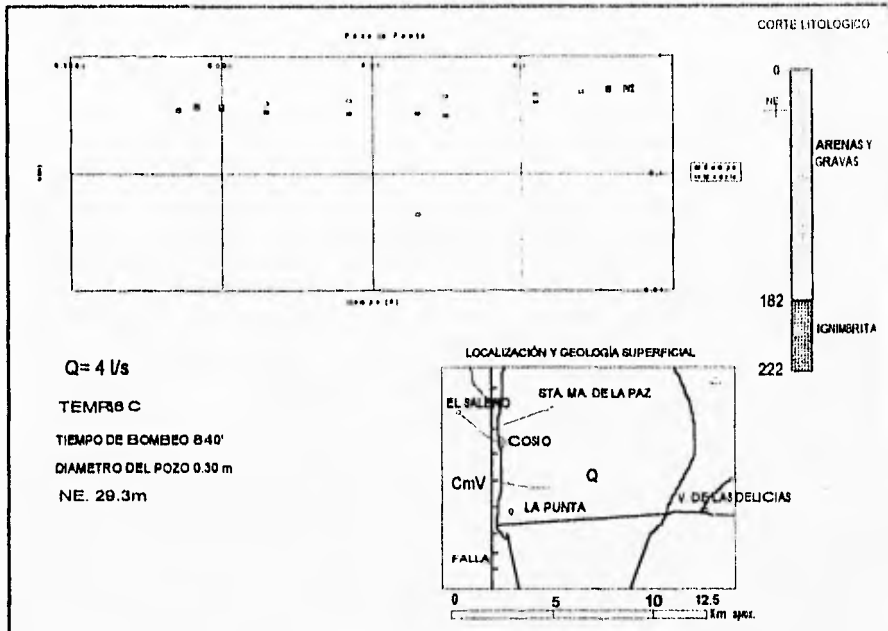
TABLA 5.1 Propiedades hidráulicas de las unidades hidroestratigráficas 26

TABLA 2.1 Relación estratigráfica de las formaciones en el estado de Ags. 14

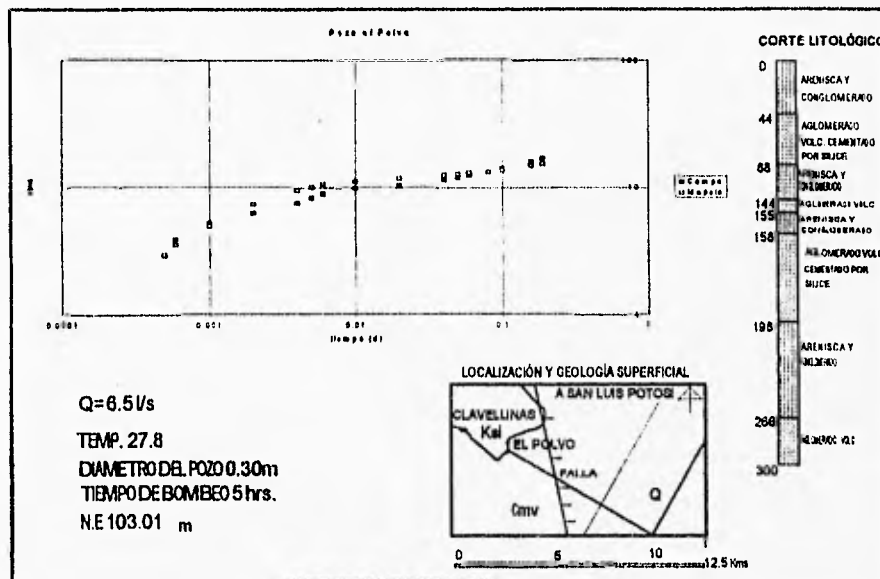
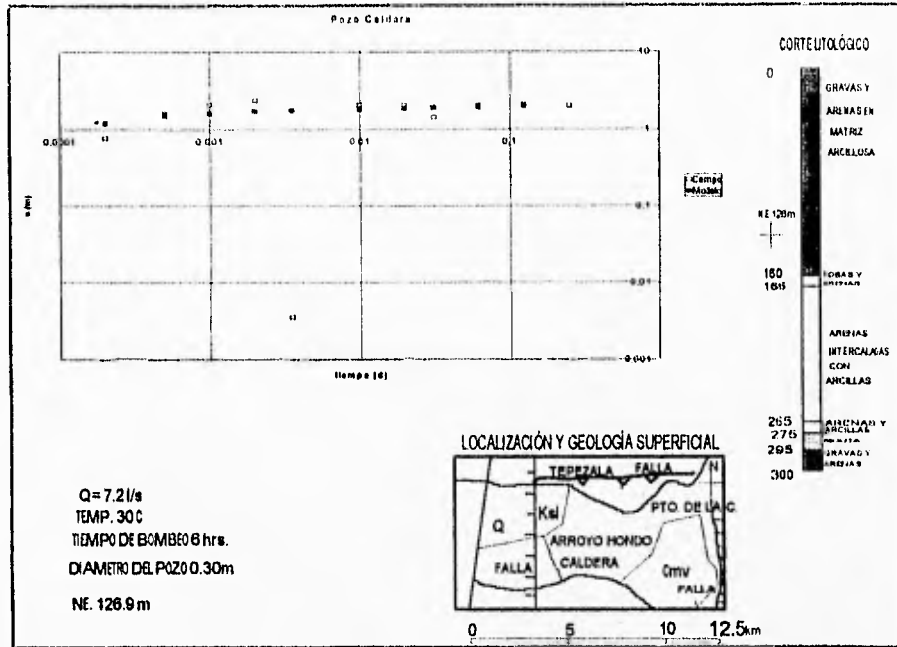
**ANEXO 1**

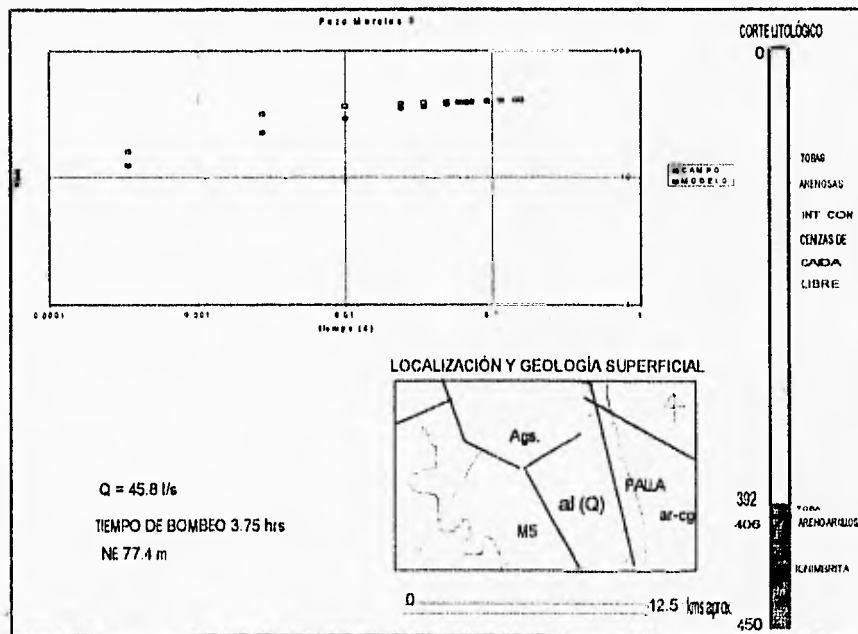
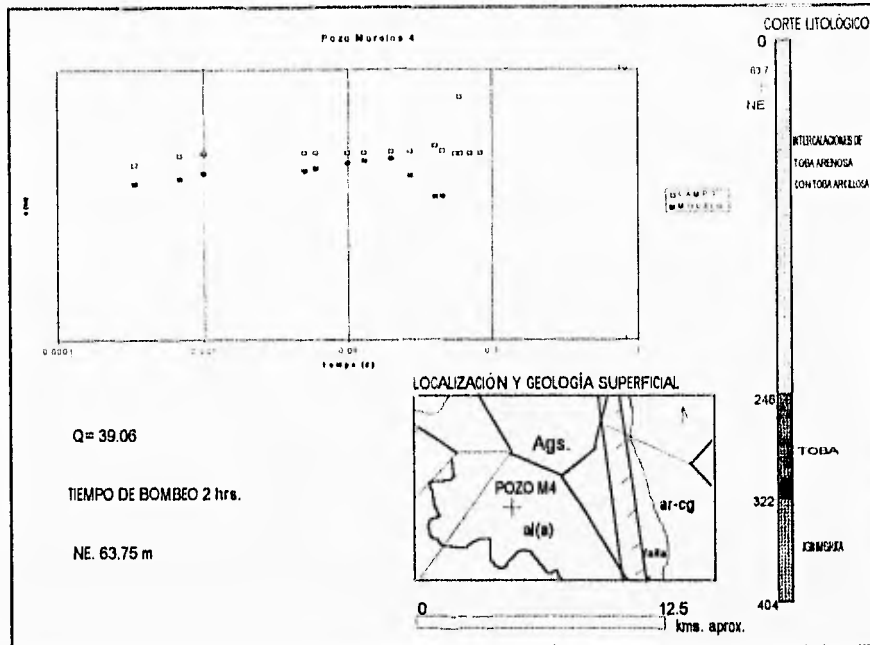
**IMPLEMENTACION DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO  
SIMULADAS A CAUDAL CONSTANTE**

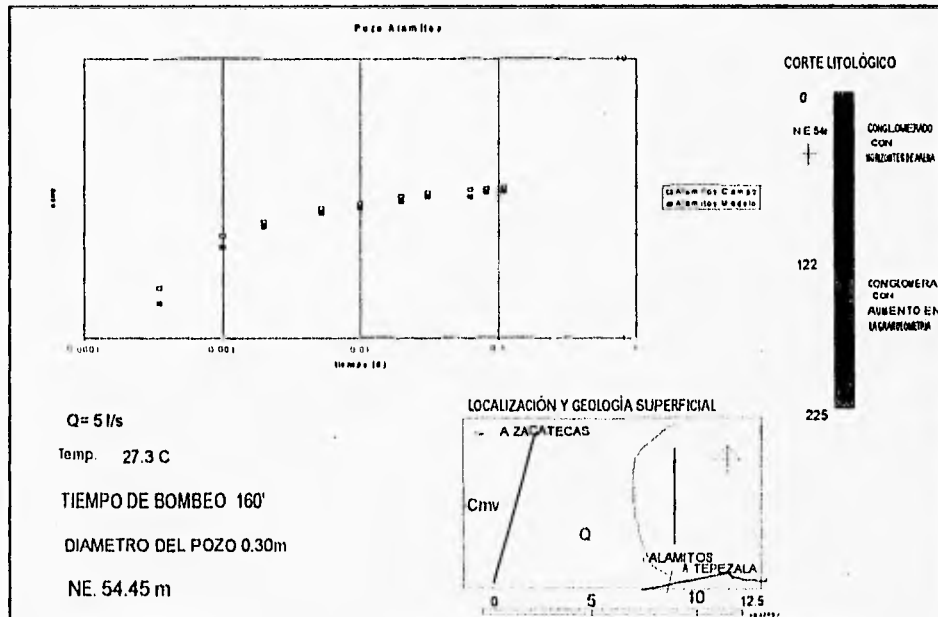
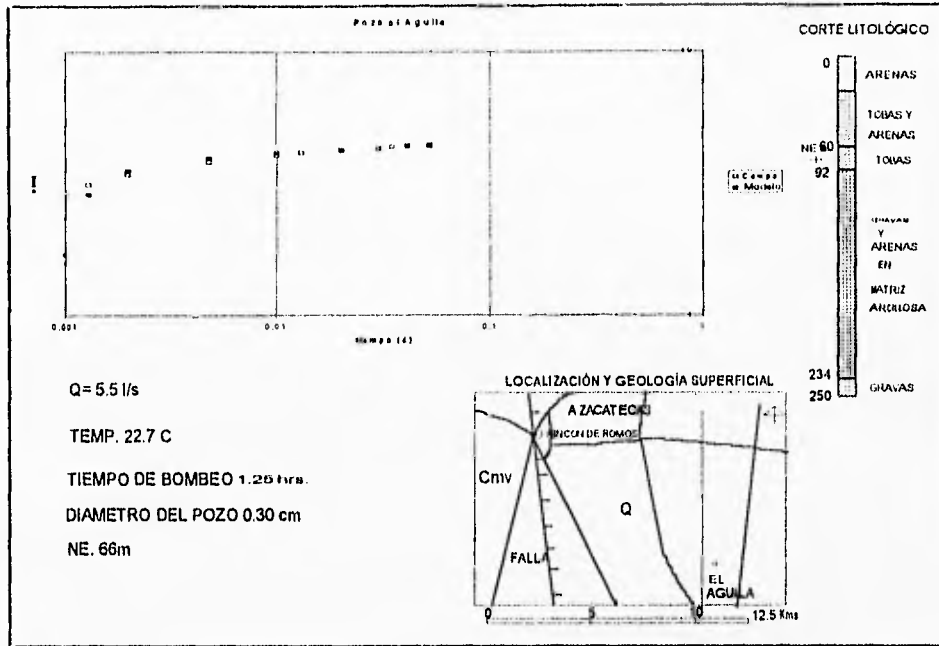


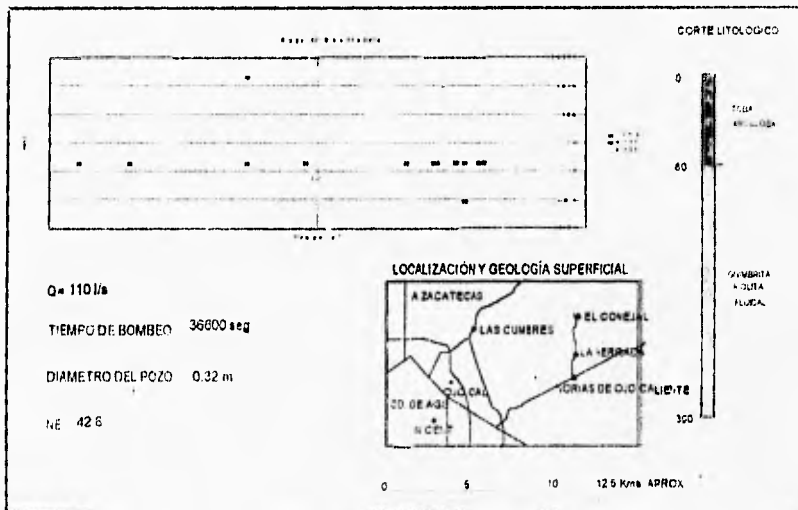
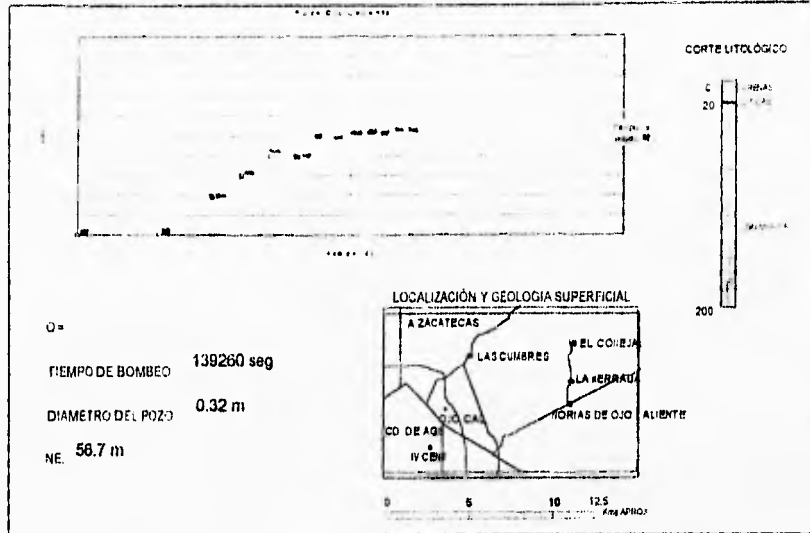


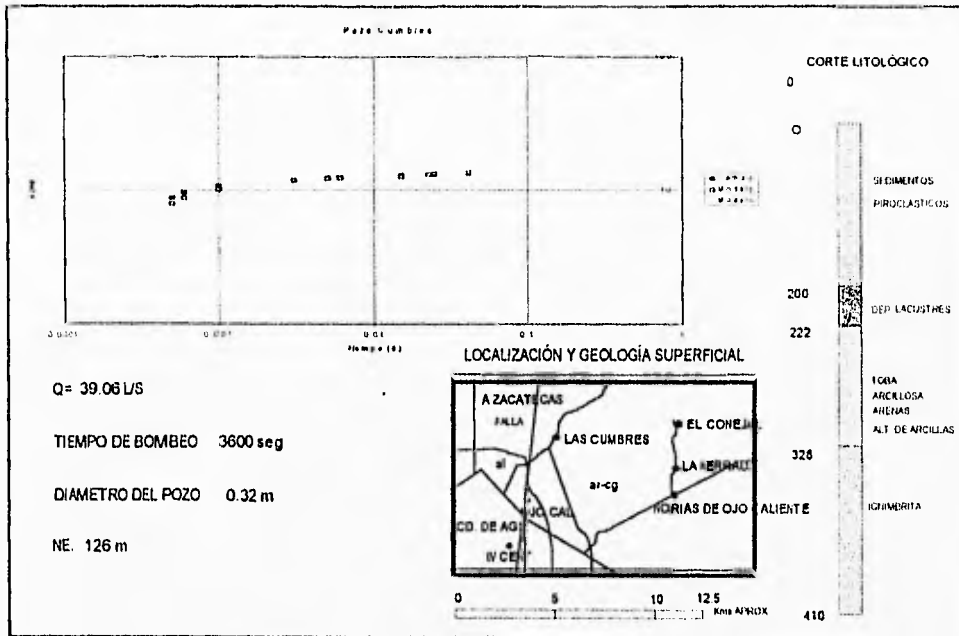


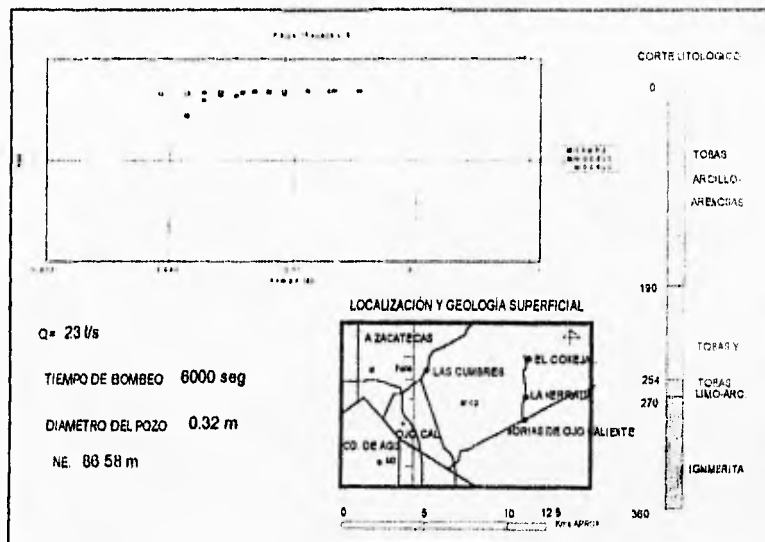












**ANEXO 2**

**DATOS DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO**

Pozo E. Fresnillo						Etapa de Recuperación	
Etapa de Abatimiento			C.E	Etapa de Recuperación			
Tiempo (días)	s (m)	Temp (C)		Tiempo (días)	s (m)		
0,0002	1,31			0,0003	9,08		
0,0003	2,29			0,0004	8,54		
0,0005	3,28			0,0005	7,9		
0,0007	3,99			0,00072	7,2		
0,001	5,21			0,001	5,83		
0,0014	6,11	26,8	651	0,0013	4,8		
0,002	7,39	27,7	685	0,002	3,31		
0,003	8,11	28,1	696	0,0027	2,31		
0,0034	8,59	28,3	696	0,0034	1,68		
0,0048	8,67	28,9	703	0,0052	1,02		
0,007	8,93	29,6	685	0,007	0,8		
0,0084	8,93	30,4	682	0,01	0,6		
0,01	9,2	30,8	683	0,0138	0,4		
0,013	9,35	31,2	708				
0,02	9,58	31,5	657				
0,027	9,83	31,6	709				
0,034	9,99	31,6	709				
0,0416	10,15	31,6	706				
0,0483	10,2	31,7	696				
0,055	10,285	31,7	701				
0,084	10,385	31,6	697				
Pozo Clavellinas				Pozo F. Ojo Caliente			
Etapa de Abatimiento			C.E	Etapa de Abatimiento			
Tiempo (días)	s (m)	Temp (C)		Tiempo (días)	s (m)		
0,0005	1,5			0,0001	3,5		
0,0006	2,02			0,0002	3,5		
0,001	2,75			0,0004	5,67		
0,0013	3,36	17,8	600	0,0009	7,15		
0,002	4,6	21,8	640	0,001	8,05		
0,003	6,1	25,7	631	0,0013	8,05		
0,0034	1,7	26,9	540	0,0018	10,07		
0,005	9,4	27,9	553	0,002	10,07		
0,007	11,25	28,6	545	0,0023	10,07		
0,01	18,02	29,1	555	0,0025	10,73		
0,013	20,895	29,3	557	0,0027	10,73		
0,02	25,905	29,5	559	0,00347	10,85		
0,03	35,43	29,7	562	0,0048	10,85		
0,034	30,31	29,7	563	0,005	10,89		
0,041	30,3	29,8	556	0,0062	10,69		
0,06	30,78	30,1	561	0,0069	10,69		
0,08	33,32	31,1	570	0,0083	10,49		
0,13	37,12	30,9	565	0,009	10,46		
0,16	38,11	31,5	579	0,0097	10,49		
0,2	38,11	31,7	582	0,01	10,64		
0,3	38,11	31,4	571	0,013	10,64		
0,33	38,11	31,4	564	0,0173	10,1		



Pozo la Punta			Pozo Morelos 4		
Etapa de Abatimiento			Etapa de Abatimiento		
Tiempo (días)	s (m)	Temp (C)	C. E	Tiempo (días)	s (m)
0,00017	0,29			0,00034	4,42
0,0003	0,472			0,00069	4,79
0,0005	0,35			0,001	4,9
0,0006	0,38	32	525	0,005	4,9
0,001	0,355	31,8	520	0,006	4,9
0,0014	0,35	31,8	518	0,01	4,9
0,002	0,335	32,6	522	0,013	4,9
0,0035	0,335	34,7	435	0,02	4,95
0,0052	0,335	35,7	430	0,027	4,95
0,007	0,328	36	457	0,04	5,19
0,01	0,32	36	445	0,045	4,97
0,014	0,325	36,2	440	0,055	4,86
0,017	0,325	36,2	464	0,059	4,86
0,02	0,325	36,2	463	0,06	4,86
0,031	0,31	36,3	450	0,07	4,86
0,042	0,316	36,4	433	0,083	4,88
0,0014	0,33	36,4	454		
0,08	0,37	36,4	463		
0,125	0,4	36,5	461		
0,16	0,43	36,6	472		
0,2	0,455	36,7	454		
0,25	0,49	36,5	446		
0,29	0,5	36,4	449		
0,33	0,525	36,5	451		
0,37	0,533	36,5	447		
0,41	0,545	36,5	444		
0,45	0,545	36,4	439		
0,5	0,545	36,4	450		
0,54	0,55	36,4	461		
Pozo el Polvo		Pozo Parque IV Centenario			
Etapa de Abatimiento		Etapa de Abatimiento			
Tiempo (días)	s (m)	Tiempo (días)	s (m)		
0,0002	2,24	0,0138	1,9		
0,0005	2,89	0,02	1,9		
0,0006	3,89	0,055	1,9		
0,001	5,31	0,09	1,9		
0,002	6,3	0,215	1,92		
0,0005	8,23	0,275	1,97		
0,01	9,81	0,284	1,97		
0,02	10,3	0,333	1,98		
0,04	11,44	0,354	2		
0,05	11,93	0,402	2		
0,06	12,38	0,413	2		
0,08	13,2	0,423	2		
0,1	14,04				
0,16	15,86				
0,19	16,79				

Pozo el Agulla				Etapa de Recuperación	
Etapa de Abatimiento		Temp (C)	C.E	Etapa de Recuperación	
Tiempo (días)	s (m)			Tiempo (días)	s (m)
0,0002	1,22			0,0002	3,06
0,0003	1,9			0,0003	3,01
0,0005	2,38			0,0005	3,57
0,0006	2,6			0,0006	2,24
0,001	2,915	25,3	740	0,001	1,745
0,0013	3,1	23,1	693	0,0013	1,46
0,002	3,4	21,9	700	0,002	1,11
0,0027	3,58	21,6	688	0,003	0,79
0,0034	3,7	21,2	681	0,0048	0,63
0,0048	3,82	21,1	691	0,0069	0,51
0,0069	3,93	21,2	695	0,01	0,39
0,01	1,05	21,8	742	0,013	0,32
0,013	4,14	22,2	725		
0,02	4,23	22,4	686		
0,03	4,3	22,7	881		
0,035	4,345	22,8	679		
0,041	4,385	22,7	675		
0,048	4,415	22,8	675		
0,052	4,15	22,7	675		
Pozo Caldera				Pozo Morelos 5	
Etapa de Abatimiento		Temp (C)	C.E	Etapa de Abatimiento	
Tiempo (días)	s (m)			Tiempo (días)	s (m)
0,0002	0,76			0,00034	16,5
0,003	1,25			0,00069	22,2
0,0005	1,565			0,00138	26,2
0,0006	1,79			0,0027	31,7
0,001	2,04			0,005	34,7
0,0014	2,23			0,01	36,355
0,002	2,32	24,7	624	0,02	38,02
0,003	2,305	25,9	799	0,024	38,285
0,0035	2,24	25,8	779	0,027	38,44
0,0048	2,075	25,8	705	0,034	38,92
0,007	2,03	26,1	689	0,041	39,165
0,01	2,02	26,4	684	0,0486	39,47
0,013	2,02	26,8	671	0,055	39,24
0,02	2	27	672	0,059	39,27
0,031	1,99	27,4	874	0,0625	39,34
0,042	2,01	27,8	888	0,0659	39,4
0,062	2	28,4	700	0,069	39,5
0,083	1,97	28,7	711	0,072	39,57
0,12	1,97	29,1	728	0,083	39,7
0,168	1,97	29,3	731	0,093	39,845
0,2	1,97	29,4	742	0,104	39,905
0,25	1,97	29,7	741	0,1145	40
			752	0,125	40
				0,145	40,225
				0,156	40,3

Pozo Cumbres	
Tiempo (días)	s (m)
0,0008	2,55
0,0002	7,11
0,00047	8,71
0,0008	9,59
0,0008	10,15
0,001	10,73
0,0012	11,11
0,0018	11,49
0,003	11,91
0,003	12,09
0,0041	12,28
0,005	12,36
0,006	12,49
0,009	12,77
0,0094	12,89
0,0146	13
0,0179	13,09
0,021	13,16
0,026	13,23
0,03	13,3
0,032	13,37
0,034	13,37
0,0416	13,39