

25



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELO GEOELÉCTRICO DEL  
ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERA GEOFÍSICA**

**P R E S E N T A :**

**GABRIELA VANESSA ZAVALA SÁNCHEZ**



DIRECTOR: ING. F. ALEJANDRO ARROYO CARRASCO

MÉXICO, D. F.

2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

Todo el material contenido en esta tesis 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 DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-613

**SRITA. GABRIELA VANESSA ZAVALA SÁNCHEZ**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carrasco y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**MODELO GEOELÉCTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO**

- I INTRODUCCIÓN
  - II METODOLOGÍA
  - III MARCO GEOLÓGICO
  - IV MODELO GEOELÉCTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO
  - V ANÁLISIS DE RESULTADOS
  - VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFÍA  
ANEXOS

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.

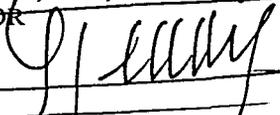
Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cd. Universitaria, D. F., a 3 de mayo de 2002

EL DIRECTOR

  
**ING. GERARDO FERRANDO BRAVO**

GFB\*RLLR\*gtg

pp

## **AGRADECIMIENTOS.**

A la Universidad Nacional Autónoma de México. Por mi raza hablará el espíritu.

A la Facultad de Ingeniería por los conocimientos recibidos.

Al Ing. Alejandro Arroyo Carrasco y al Ing. Héctor Macías por toda la información y el apoyo brindado para la realización de la presente tesis. Gracias por la infinita paciencia y las grandes enseñanzas.

Al M. C Ambrosio Aquino, al Ing. Enrique del Valle, y al M. C Andrés Tejero por los comentarios y el tiempo dedicado a la revisión de mi trabajo.

## **DEDICATORIA.**

A mi padre y a mi madre, gracias papá por tu paciencia y cariño, mamá, gran parte de la tesis va para ti.

A Lo, mi hermana consentida, gracias por tu apoyo, desde hace 25 años haz estado pendiente de mí.

A Rocío, mi otra hermana consentida, los años contigo han pasado volando, y siempre hemos tratado de que sean los mejores. Gracias por todo tu cariño y tu alegría al vivir.

A Jonathan, gracias por estos años de alegría y de amor. A Memo, Celia, Paco, Tere, Nereo, Ivo, Manuel, Gaby, por la amistad y los buenos ratos compartidos.

A Lalo, Toño y Alejandro, mis tres... amigos por siempre.

A Ro, toda mi gratitud para tu persona, tanto en lo académico como en tu gran amistad.

A Mauricio Pico, la carrera no hubiera sido tan divertida sin tu compañía.

A Ale, Chela, Bruno, Lora, Paco, Espriu por hacer del tormento en campo una fiesta.

---

**Zavala Sánchez Gabriela Vanessa.**

Universidad Nacional Autónoma de México.  
Facultad de Ingeniería.

## ÍNDICE.

<b>RESUMEN.</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPITULO I.</b> .....	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b> .....	<b>3</b>
1.1 Antecedentes. ....	3
1.2 Objetivos. ....	4
1.3 Estudios Previos. ....	5
1.4 Área de estudio.....	8
<b>CAPITULO II.</b> .....	<b>11</b>
<b>METODOLOGÍA.</b> .....	<b>11</b>
2.1 Propósito.....	12
2.2 Modelo Geológico Previo. ....	12
2.3 Modelo Geofísico.....	12
2.4 Modelo Geológico - Geofísico. ....	14
2.5 Análisis de Resultados.....	14
<b>CAPITULO III.</b> .....	<b>18</b>
<b>MARCO GEOLÓGICO DE REFERENCIA.</b> .....	<b>18</b>
3.1 Fisiografía.....	18
3.2 Marco Geológico Regional. ....	20
3.3 Estratigrafía. ....	22
3.4 Geología Estructural.....	29
<b>HIDROGEOLOGÍA.</b> .....	<b>33</b>
3.5 Características Hidrogeológicas de las formaciones. ....	33
3.6 Geología del Subsuelo.....	34
<b>CAPITULO IV.</b> .....	<b>38</b>
<b>MODELO GEOELÉCTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO.</b> .....	<b>38</b>
4.1. Fundamentos Físicos. ....	38
4.2. Teoría del Sondeo Eléctrico Vertical para un semiespacio homogéneo. ....	39
4.3 Interpretación Teórica. ....	42
4.4 Aplicación directa de los Parámetros de Dar Zarrouk en problemas de Hidrogeología.....	52
4.5. Aplicación de la teoría.....	53
4.6. Interpretación a la Geofísica.....	54
4.7 Modelo geoelectrico. ....	64

<b>CAPITULO V.</b> .....	<b>83</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.</b> .....	<b>83</b>
5.1 Integración Geológico – Geofísico - Geohidrológico. ....	83
5.2 Modelo geológico – geofísico general. ....	87
5.3 Determinación de capas índice. ....	89
5.4 Ubicación de zonas preferentes de explotación. ....	91
<b>CAPITULO VI.</b> .....	<b>105</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b> .....	<b>105</b>
6.1 Conclusiones. ....	105
6.2 Recomendaciones.....	107
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b> .....	<b>108</b>
<b>EJEMPLO DE INFORMACIÓN EN ANEXO 1.</b> .....	<b>111</b>
<b>EJEMPLO DE INFORMACIÓN EN ANEXO 2.</b> .....	<b>112</b>
<b>ANEXO 1</b> .....	<b>En disco.</b>
<b>ANEXO 2</b> .....	<b>En disco.</b>

## **RESUMEN.**

El presente trabajo propone un modelo geoelectrico para el área ubicada en la porción sur-oriental del Estado de Querétaro, dicha área se encuentra situada en el valle originado por el Graben de Querétaro, el cual se encuentra relleno de sedimentos aluviales y lacustres alternándose con flujos de lava andesítica y/o basáltica de espesor variable. Estos materiales están parcialmente saturados de agua y forman el acuífero del valle de Querétaro.

Para la elaboración del modelo geoelectrico se contó con la información de 79 pozos con corte litológico, cuya nomenclatura se homogeneizó; se reinterpretaron 52 sondeos eléctricos verticales mediante el programa de cómputo RESIX Plus v.2. Se estima el grado de validez del modelo propuesto mediante la resolución del problema directo utilizando el filtro digital lineal tipo Anderson. Se analizaron los cortes geoelectricos equivalentes y se eligieron aquellos que respondieran mejor a las condiciones geológicas imperantes en la zona basándose en la calibración de los modelos mediante los cortes geológicos cercanos.

Se realizaron 8 secciones geológicas geofísicas, 5 con orientación preferencial E-W y las tres restantes con orientación N – S; en una primera etapa se analizaron los perfiles eléctricos partiendo en forma inicial de la interpretación cualitativa de los perfiles de isoresistividad aparente; posteriormente, al modelo geoelectrico se le integró la información de los cortes litológicos de pozos, anexando, finalmente, la profundidad del nivel estático para diciembre de 1995.

El resultado del análisis de los cortes litológicos y de la interpretación de los sondeos, distribuidos en 8 secciones dio como resultado un modelo geoelectrico en donde se identificaron 8 unidades, el rasgo principal es una alternancia de unidades de baja resistividad, con valores del orden de 1 a 19 ohm-m, con unidades de alta resistividad, 21 a 560 ohm-m. Las capas interpretadas se caracterizan por la variación en sus espesores, pero presentan una apreciable continuidad lateral y superficial.

Las capas de baja resistividad fueron asociadas a sedimentos vulcanolacustres, tobas, arcillas, gravas y basaltos sumamente alterados, los cuales pertenecen al medio poroso; mientras que las de alta resistividad se asociaron a coladas basalto andesíticas, las cuales conforman el medio fracturado.

Mediante una herramienta cualitativa, relacionada con la sumatoria de la resistencia transversal unitaria de las capas pertenecientes al medio poroso, se proponen 12 zonas preferentes para la explotación de agua subterránea, dicha herramienta se valida mediante la comparación del mapa de resistencia transversal

con un mapa de Transmisividad hidráulica obtenido mediante la información de pruebas de bombeo para nueve pozos .

Se establecen como capas índice a las unidades pertenecientes al medio poroso, las cuales conforman la capa productora del acuífero.

No se pudo determinar, mediante la información recabada, una capa impermeable que actuara como basamento del acuífero, por lo que se concluye que ésta existirá a profundidades mayores a 500 metros. Para definir dicha profundidad, se recomienda realizar una campaña de exploración electromagnética específicamente en los sitios que se marcan como más favorables para la extracción de agua subterránea.

# CAPITULO I.

## INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Antecedentes.

La Ley de Aguas Nacionales establece que se entenderá por acuífero "cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento".

Para determinar la existencia de un acuífero, cuantificar el volumen de agua que contiene, sus características físicas (geometría, límites, zonas de recarga, zonas de descarga natural, etc.) en búsqueda de asegurar una explotación sustentable del mismo, ha sido necesario desarrollar y aplicar conocimientos interdisciplinarios con el fin de entender su comportamiento. La forma de hacerlo ha sido mediante modelos teóricos y matemáticos que simulan las condiciones observadas.

Se define como un modelo a toda representación aproximada de la realidad. En el área de Hidrogeología existen tres tipos de modelos, diferenciados según su propósito: predicción, interpretación o análisis genérico.

Los modelos predictivos son aquellos que se utilizan para predecir eventos futuros a través del análisis del comportamiento previo observado por el acuífero, dicho modelo requiere calibración, es decir, se busca establecer que el modelo pueda reproducir las cargas y los flujos medidos en campo. El modelo interpretativo es aquél que se elabora con la finalidad de organizar y sintetizar los datos de campo, es la base necesaria para entender la dinámica de un sistema de flujo. Finalmente, un modelo genérico es el que se utiliza para analizar el flujo en sistemas hidrológicos hipotéticos, son útiles para fines de normatividad de una región específica.

Para la modelación matemática de un acuífero es necesario contar con un modelo conceptual previo, en el cual se encuentren perfectamente definidas las unidades hidrogeológicas, sus espesores y su comportamiento dentro del sistema, así como sus características tanto petrográficas (porosidad, fracturamiento, alteración, metamorfismo, etc.), como sus características hidrogeológicas tales como transmisividad  $T$ , conductividad  $K$ , entre otras. Es necesario establecer su relación estratigráfica, los rasgos estructurales predominantes de la zona ya que éstas pueden llegar a actuar como fronteras del sistema.

Ante estos argumentos, se establece que el presente trabajo de Tesis se encarga de generar un Modelo Interpretativo del acuífero del valle de Querétaro, el cual podrá ser la base o modelo conceptual para trabajos de modelación matemática posteriores.

Para ello se plantea la relación existente entre los parámetros de Dar Zarrouk (Conductancia Transversal y Conductancia Longitudinal) con las propiedades hidrogeológicas del acuífero estudiado.

La elección de la zona de trabajo se derivó de la gran cantidad de datos de campo y de información geológica referente a la misma, los cuales fueron proporcionados por la Compañía de Exploración GUYSA.

## **1.2 Objetivos.**

Los principales objetivos del presente trabajo de Tesis fueron:

- Establecer un modelo geoelectrico general para el acuífero del valle de Querétaro.
- Determinar una Capa índice de referencia, ya sea el basamento, o bien cierta continuidad de las unidades.
- Ubicar zonas preferentes de explotación.

### **1.2.1 Alcances.**

Los alcances del trabajo fueron los siguientes:

- Homologación de términos empleados en la caracterización de cortes geológicos, a través de la recopilación e interpretación de los mismos en una base de datos.
- Recopilación y elaboración de base de datos de sondeos eléctricos verticales empleados, se establece su abertura  $AB/2$ , equipo empleado, coordenadas, y el estudio del cual se desprenden.
- Reinterpretación eléctrica de los sondeos.
- Generación de un programa de cómputo que calcula los parámetros de Dar Zarrouk, así como la curva del mismo nombre.
- Relacionar parámetros de Dar Zarrouk con las características hidrogeológicas del acuífero.
- Delimitar zonas preferentes para explotación.

### **1.3 Estudios Previos.**

A lo largo de la historia de cualquier asentamiento humano, una de las principales preocupaciones ha sido el abastecimiento de agua para consumo humano y para actividades agrícolas e industriales; la ciudad de Querétaro no es la excepción.

Dentro del trabajo elaborado por la compañía GEOFÍSICA DE EXPLORACIONES GUYSA, S.A. DE C.V., titulado "Estudio De Simulación Hidrodinámica Y Diseño Óptimo De La Red De Observación En Los acuíferos De Aguascalientes Y Querétaro" que surgió en respuesta al contrato No.GAS-008-PR-096; se encuentra un resumen detallado de los estudios previos realizados dentro del área de estudio, se establecen sus principales objetivos y propósitos; con el fin de documentar el presente trabajo se retomó dicha información.

- **1910.** "Estudio geohidrológico de la Cañada de Hércules". Instituto Geológico de México. Su objetivo fue el aumentar el caudal proveniente del manantial de la Cañada mediante una obra hidráulica, con el fin de abastecer a la ciudad de Querétaro.
- **1970.** "Estudio geohidrológico de los valles de Querétaro, San Juan del Río y Tequisquiapan, en el valle de Querétaro." Ingeniería y Sistemas, S.A. Propone una red de pozos piloto para determinar la dirección del flujo subterráneo. Relaciona cargas hidráulicas verticales y establece la profundidad del nivel estático, a partir de ello estima que el acuífero se encuentra sobre explotado.
- **1977.** "Estudio geohidrológico, Río Lerma, modelo tectónico y subcuencas subterráneas." Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Su objetivo primordial fue la realización de la carta tectónica de la zona, lo que permitió identificar la interdependencia entre los principales acuíferos debido al esquema geológico estructural.
- **1980.** "Estudio servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en el Estado de Querétaro". Cía Servicios Geológicos, S.A. de C.V. dentro de este trabajo se emplearon técnicas isotópicas para determinar las fuentes de recarga del acuífero de Querétaro y su funcionamiento hidrodinámico relacionado a los acuíferos aledaños.
- **1981.** "Estudio geohidrológico del valle de Querétaro". Cía. Construcciones Alas S.A. de C.V. Se basa en exploración geoelectrica para determinar el marco conceptual del acuífero, a través de la delimitación de unidades geoelectricas.
- **1982.** "Estudio geohidrológico valle de Querétaro". Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Publicas para el Estado de Querétaro. Su propósito fue la localización de zonas favorables de explotación. Con las conclusiones se definieron las fuentes alternas y externas de abastecimiento a la ciudad y el marco conceptual de funcionamiento de flujo subterráneo de la cuenca.

- **1984.** " Cartografía Geomorfológica del Bajío y Porciones Adyacentes, 1:250,000", Gerardo Bocco, Boletín número 14 del Instituto de Geografía, UNAM. En este informe se define la carta geomorfológica de la zona de interés con base en el análisis de parámetros morfométricos, geología y topografía a escala 1: 250,000.
- **1986.** "Estudio hidrogeoquímico en diversos valles del Estado de Querétaro". Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. El objetivo fue el de conocer la calidad del agua subterránea, su distribución, identificación de las fuentes subterráneas y la relación entre los diferentes acuíferos. Dando como resultado que el agua subterránea analizada del área era de buena calidad según las normas de la Secretaría de Salubridad y Asistencia.
- **1986.** "Estudio hidrogeológico y geoquímico de la zona industrial Benito Juárez de la ciudad de Querétaro". Cía Geofísica de Exploraciones Guysa S.A. de C.V. Su objetivo fue identificar la fuente de contaminación del agua subterránea por grasas y aceites en la zona industrial, así como el mecanismo de introducción de dichos derivados de hidrocarburos al acuífero y su extensión, se analizaron además, las concentraciones de plomo, cadmio y níquel de dicha zona, el muestreo se llevó a cabo en pozos de uso industrial y en sus sistemas de desechos de cada fábrica. La empresa realizó recomendaciones enfocadas realizar un estudio geohidrológico de tal forma que se relacionaran los efectos de la contaminación con el marco conceptual.
- **1986.** "Síntesis geográfica nomenclator y anexo cartográfico del Estado de Querétaro". INEGI. Visión integrada de las posibilidades y aprovechamientos de los recursos hidráulicos naturales de acuerdo a su regionalización.
- **1987.** "Sinopsis geohidrológica del Estado de Querétaro". Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Integrar y difundir los resultados de las exploraciones y estudios realizados en el acuífero del VQ. En este informe se presenta un balance general de aguas subterráneas.
- **1991.** "Estudio geohidrológico integral del VQ y sus alrededores para el manejo automatizado de los recursos hidráulicos subterráneos". Cía Geofísica de Exploraciones Guysa S. A. de C.V. Se elaboró con el propósito de definir el marco conceptual de funcionamiento del acuífero, cuantificar el estado de balance entre la recarga y descarga, localizar zonas favorables para la extracción de agua subterránea en forma inmediata y a mediano plazo, implementar un modelo matemático que simulara las condiciones hidráulicas iniciales y actuales para que se realicen predicciones con cambios en los regímenes de explotación y extracciones adicionales a diferentes periodos.
- **1992 – 1996.** "Seguimiento al estudio geohidrológico integral del valle de Querétaro y sus alrededores para el manejo automatizado de los recursos hidráulicos subterráneos (1992)". "Actualización geohidrológica del VQ (1993)". "Actualización geohidrológica del VQ, Estado de Querétaro (1994)". "Actualización geohidrológica de los acuíferos del Estado de Querétaro (1995)". "Plan de apoyo al manejo integral del agua subterránea para los

principales valles del Estado de Querétaro (1996)". Cía Geofísica de Exploraciones Guysa S. A. de C.V. Dichos estudios estuvieron enfocados principalmente a dar continuidad y actualizar la información geohidrológica, e incrementar el conocimiento a los valles más importantes en el estado de Querétaro, analizar el comportamiento del acuífero mediante monitoreo anual de la posición de los niveles del agua subterránea, actualización de los volúmenes de extracción, del censo de captaciones y de la red de pozos piloto, nivelación topográfica de brocales, pruebas de bombeo, calidad del agua, calibraciones periódicas del modelo de simulación y sobre todo la definición de un programa que garantizara el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Querétaro dentro del mismo valle o por fuentes externas.

- **1989 –1996.** La empresa GUYSA elaboró dentro de la zona de estudio aproximadamente 30 dictámenes que apoyaron a la Comisión Estatal de Aguas en la localización de nuevas fuentes de abastecimiento a las comunidades aledañas a la ciudad.
- **1993.** "Estudio para la determinación de áreas factibles para que se lleve a cabo el proceso de infiltración natural o inducida enfocado al mejoramiento del acuífero y medio ambiente en el VQ". Geofísica de Exploraciones GUYSA. Se elaboró con el objetivo de conocer el impacto del crecimiento desordenado de la mancha urbana en zonas de infiltración y reordenar el crecimiento de dicha mancha hacia zonas que no afecten el proceso natural de infiltración.
- **1993.** "Dictamen sobre la situación que prevalece en los distintos basureros de desechos sólidos y efluentes industriales y municipales en los valles de Querétaro y San Juan del Río". Geofísica de Exploraciones GUYSA.
- **1994.** "Dictamen sobre la aparente presencia de hidrocarburos en el acuífero del VQ, en la porción que cubre la zona industrial Benito Juárez". Geofísica de Exploraciones GUYSA. El objetivo de este trabajo fue determinar por análisis geoquímico la presencia de hidrocarburos y su relación con los límites máximos permisibles.
- **1994.** "Modelo de optimización, (primera etapa)". Geofísica de Exploraciones Guysa S.A. de C.V. Elaborado para la Comisión Estatal del Aguas de Querétaro, con el objetivo de optimizar el uso del agua mediante cancelación de bombeo por intercambio y redistribución de agua residuales previamente tratadas.
- **1995.** "Estudio de factibilidad para satisfacer las necesidades de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Querétaro". Cía Eco-Ingeniería S.A. de C.V.. El objetivo, ubicar sitios para instalar plantas de tratamiento de agua residuales en la ciudad, por medio de sistemas de información geográfica.
- **1995.** "Resumen de la actualización geohidrológica del estado de Querétaro a diciembre de 1994". Cía Geofísica de Exploraciones Guysa S.A. de C.V.. El objetivo mantener la actualización de la información geohidrológica del acuífero de VQ mediante una nueva estimación en la relación recarga - descarga.

- **1996.** “Proyecto de rescate integral de la cuenca del Río Querétaro”. Cía Geofísica de Exploraciones Guysa S.A. de C.V.. Este trabajo presenta objetivos sólidos para controlar el tránsito de avenidas de agua de lluvia hacia la ciudad y favorecer mediante la retención del agua los procesos de infiltración al subsuelo mediante la construcción de una presa de almacenamiento de agua superficial.

## **1.4 Área de estudio.**

El área de estudio se encuentra situada sobre la planicie del valle de Querétaro, la cual presenta una altura máxima de 1800 msnm, el valle se encuentra delimitado por una topografía accidentada, la parte sur, norte y este del área está constituida por sierras de laderas tendidas con orientación norte-sur desde Santa Rosa de Jáuregui hasta el poblado de Huimilpan, poblado localizado en la parte sur, fuera del área de estudio, constituida por rocas volcánicas de edad cuaternaria, se extienden desde el Cerro El Cimatario al sur hasta Obrajuelo y Mompani al norte. Las principales elevaciones dentro del área, corresponden al Cerro Cimatario (2340 msnm).

### **1.4.1 Localización.**

La zona de estudio se encuentra ubicada en la porción sur-oriental del Estado de Querétaro, sus coordenadas UTM van desde 2270000 a 2287000 de latitud Norte y de 340000 a 364000 de longitud Oeste. Los límites fueron establecidos en respuesta a la información recabada, con el propósito de abarcar la mayor extensión posible (**fig. 1**).

### **1.4.2 Extensión.**

La zona comprende una superficie en forma de rectángulo horizontal de 24 Km de largo por 17 de ancho, el área total es de 408 Km<sup>2</sup>; incluye a la ciudad de Querétaro, a los poblados de Carrillo Puerto, Jurica, Tlacote El Bajo, Villa del Marques, Villa Cayetano Rubio, Corregidora y el corredor industrial Benito Juárez.

Hacia el oeste, se puede observar que la zona de estudio abarca un área perteneciente al Estado de Guanajuato.

# MODELO GEOELÉCTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO

## TESIS PROFESIONAL

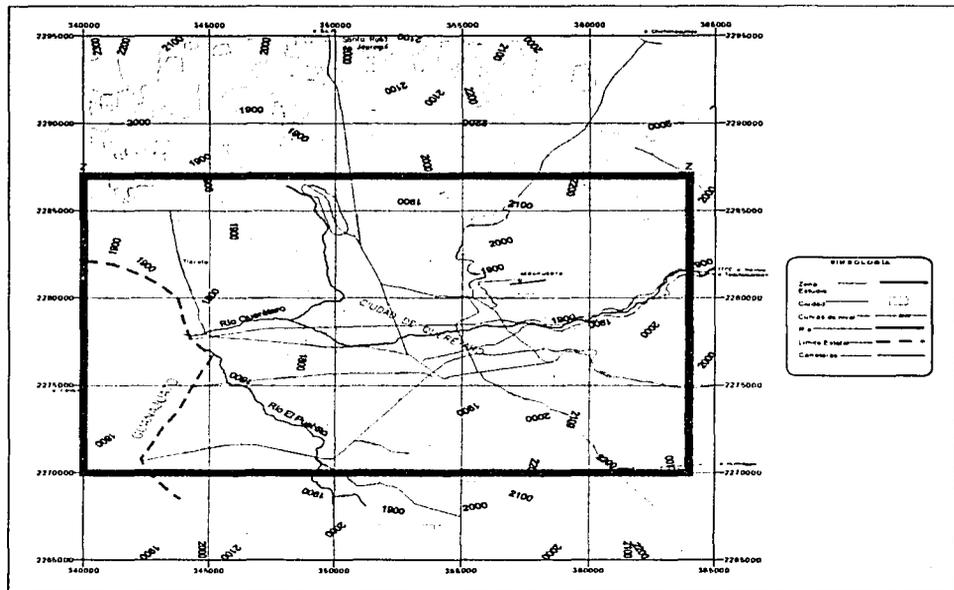


Fig.1 Localización de la zona de estudio

### 1.4.3 Vías de comunicación.

Los ejes federales que comunican el territorio de Querétaro son: la autopista México-Querétaro (No. 57), la carrera federal No.120, que proviene de Morelia, Michoacán y el eje No. 45 que entronca con la carretera No. 57. Esta infraestructura vial se fortalece con los caminos estatales y vecinales que se derivan de las rutas antes mencionadas.

### 1.4.4 Población.

La zona de estudio comprende en su totalidad los municipios de Querétaro y Corregidora, sólo en el municipio de Querétaro vive el 45.6% de la población estatal total, estimada en 1 402, 010 en el conteo realizado en febrero de 2000 (INEGI,2000).

Si se considera además, a los municipios de El Marqués, Corregidora y Pedro Escobedo, es decir, los que constituyen el llamado Corredor San Juan del Río-Querétaro, con mucho la zona más comunicada, industrializada y tecnificada agrícolamente, el porcentaje de la población total suma cerca del 73%.

**Zavala Sánchez Gabriela Vanessa.**

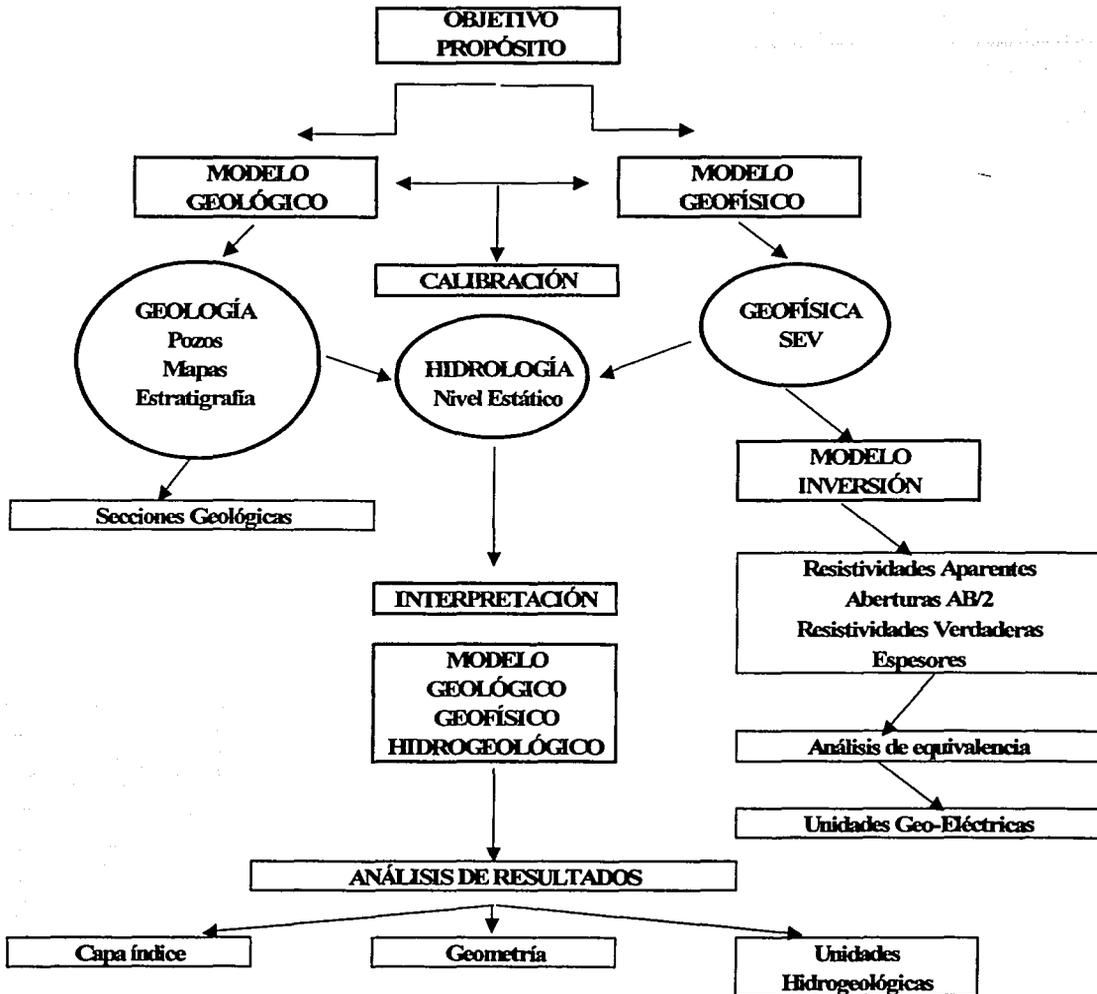
Universidad Nacional Autónoma de México.  
Facultad de Ingeniería.

De acuerdo con la información estadística, la principal actividad económica desarrollada por la población de los municipios mencionados, es la de servicios con un 40.3 % del total de su población, seguida por el comercio (19.4%) y la industria de la transformación (20.9%). El sector agropecuario ocupa únicamente al 1.3 % de la población asentada en la zona estudio.

Se concentra entonces en esta porción del estado parte de la industria manufacturera, de productos alimenticios, textil, metal-mecánicos, eléctricos y químicos más importantes del país, así como también es notoria su participación en el sector turístico, considerándose un patrimonio nacional por su valor histórico.

## CAPITULO II.

### METODOLOGÍA.



## 2.1 Propósito.

El propósito del trabajo es construir un modelo interpretativo, ya que se utilizará para organizar y sintetizar los datos de campo, con lo cual se buscará una interpretación de la geometría del acuífero del valle de Querétaro.

## 2.2 Modelo Geológico Previo.

Una vez seleccionada la zona de estudio, fue necesario recopilar la información geológica existente sobre la misma, esto es, información estratigráfica y geológica; mapas topográficos, geológicos, hidrogeológicos y estructurales, ubicación de pozos e interpretación de sus cortes geológicos así como pruebas de bombeo.

Fueron seleccionados 79 pozos con sus respectivos cortes geológicos, los cuales fueron, en primer lugar, localizados en el mapa (**figura 2.1**), posteriormente se recabó y clasificó la información litológica con el fin de homogeneizarla debido a que proceden de diferentes compañías perforadoras y la clasificación depende del criterio de cada perforista. Se elaboró una base de datos con los pozos localizados en la zona de estudio, ordenándolos por el número de censo propuesto por la CNA, agregando su nombre, profundidad y corte geológico; así como su posterior interpretación (**Anexo 1**).

Dentro del Capítulo V se profundiza en el análisis de los cortes geológicos. Se establece el criterio utilizado para su interpretación, el cual estuvo basado, principalmente, en la estratigrafía propuesta en el estudio titulado Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México, (Alaniz-Álvarez et al, 2001); así como en el estudio geohidrológico para el valle de Querétaro que la empresa de exploración GUYSA realizó en el año de 1990.

## 2.3 Modelo Geofísico.

Fueron seleccionados y localizados dentro del área de estudio 52 Sondeos Eléctricos Verticales proporcionados por GUYSA (**figura 2.2**). Se elaboró una base de datos con la información de dichos sondeos, como lo es el estudio del que proceden, su abertura AB/2, su localización y el equipo empleado, (**Anexo 2**).

De igual manera, se anexa el modelo óptimo obtenido y el porcentaje de error arrojado por el mismo.

### **2.3.1 Inversión y resolución del Problema Directo.**

Se procedió a la reinterpretación de los datos de campo utilizando para ello el sistema de cómputo RESIX Plus v.2, el cual es un software elaborado por la empresa INTERPREX, cuyo propósito es la interpretación de datos resistivos y de polarización inducida.

RESIX Plus permite, como una opción, la entrada de datos de resistividad aparente medidas directamente en campo y su correspondiente  $AB/2$  para un dispositivo tipo Schlumberger; la interpretación de los datos se basa en el método de inversión de "ridge regression" propuesto por Inman (Inman et al, 1975) empleando para ello el procedimiento clásico de Gauss-Newton, fundamentado en el desarrollo de Taylor de las derivadas y el cálculo de un parámetro que haga mínima la suma de los cuadrados de los errores. Se estima el grado de validez del modelo propuesto mediante la resolución del problema directo utilizando el filtro digital lineal tipo Anderson.

### **2.3.2 Análisis de equivalencia.**

La interpretación de una misma curva de campo puede llevar a cortes geoelectricos dispares entre sí, incluso, en el número de capas. Sin embargo, la multiplicidad de soluciones se transforma en cierta imprecisión de los resultados si la función resistividad-profundidad se expresa en nuevas coordenadas, denominadas pseudo-profundidad y resistividad media; dichas coordenadas reciben el nombre común de funciones de Dar Zarrouk.

Fue elaborado un programa de cómputo como herramienta para el cálculo de las curvas de Dar Zarrouk y de los parámetros S y T, de cada uno de los sondeos interpretados.

Dichos parámetros fueron relacionados con las características hidrogeológicas del acuífero, basándose en los trabajos de Sri Niwas (Sri Niwas et al, 1981) y (Sri Niwas et al, 1985), en los cuales plantea la posibilidad de obtener la Transmisividad del acuífero a partir del cálculo de los parámetros de Dar Zarrouk.

Se analizaron los cortes geoelectricos equivalentes y se eligieron aquellos que respondieran mejor a las condiciones geológicas imperantes en la zona basándose en la calibración de los modelos mediante los cortes geológicos cercanos.

## 2.4 Modelo Geológico - Geofísico.

Se elaboraron ocho secciones geológicas preliminares con los datos topográficos, estructurales y geológicos partiendo del mapa geológico y de la información de los cortes geológicos de los pozos seleccionados.

La dirección y orientación de las secciones se estableció con base en la localización de los pozos y de los SEV, tratando de contener en cada sección la mayor cantidad de información. (fig. 2.3)

Una vez que se tuvo la interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), calibrados con los pozos cercanos, se procedió a la elaboración de las secciones geológicas - geofísicas, las cuales fueron la base para construir el modelo de la geometría del acuífero del valle de Querétaro.

Al modelo propuesto se le incorporó la información de la profundidad del nivel estático para diciembre de 1995, mediante lo cual se pudo observar el comportamiento de las unidades geológicas propuestas y diferenciar entre unidades pertenecientes al medio poroso, o al medio fracturado.

## 2.5 Análisis de Resultados.

Para el análisis de resultados se partió de los objetivos propuestos al principio del trabajo, con la finalidad de cubrirlos ampliamente.

La elaboración del modelo geoelectrico se derivó del análisis de las secciones realizadas, se delimitaron unidades rocosas siguiendo un patrón de comportamiento resistivo aunado al análisis de la información geológica y litológica de los pozos empleados.

De igual manera, se propone un nuevo modelo que presume continuidad en las unidades propuestas. No fue posible determinar el basamento debido a que los pozos no alcanzan profundidades mayores a 500 m, y los SEV no presentaron la abertura  $AB/2$  necesaria para profundizar la zona de estudio, aunado a las características físicas de alta resistividad de algunas unidades, las cuales generaron pantallas resistivas que no se pudieron traspasar.

Se realiza el análisis de la geometría propuesta y su relación hidrogeológica, estableciendo las características de las capas consideradas como índice.

Dentro del Capítulo V se establece la discusión de los resultados; se enumeran los alcances y las limitantes del modelo geoelectrico propuesto.

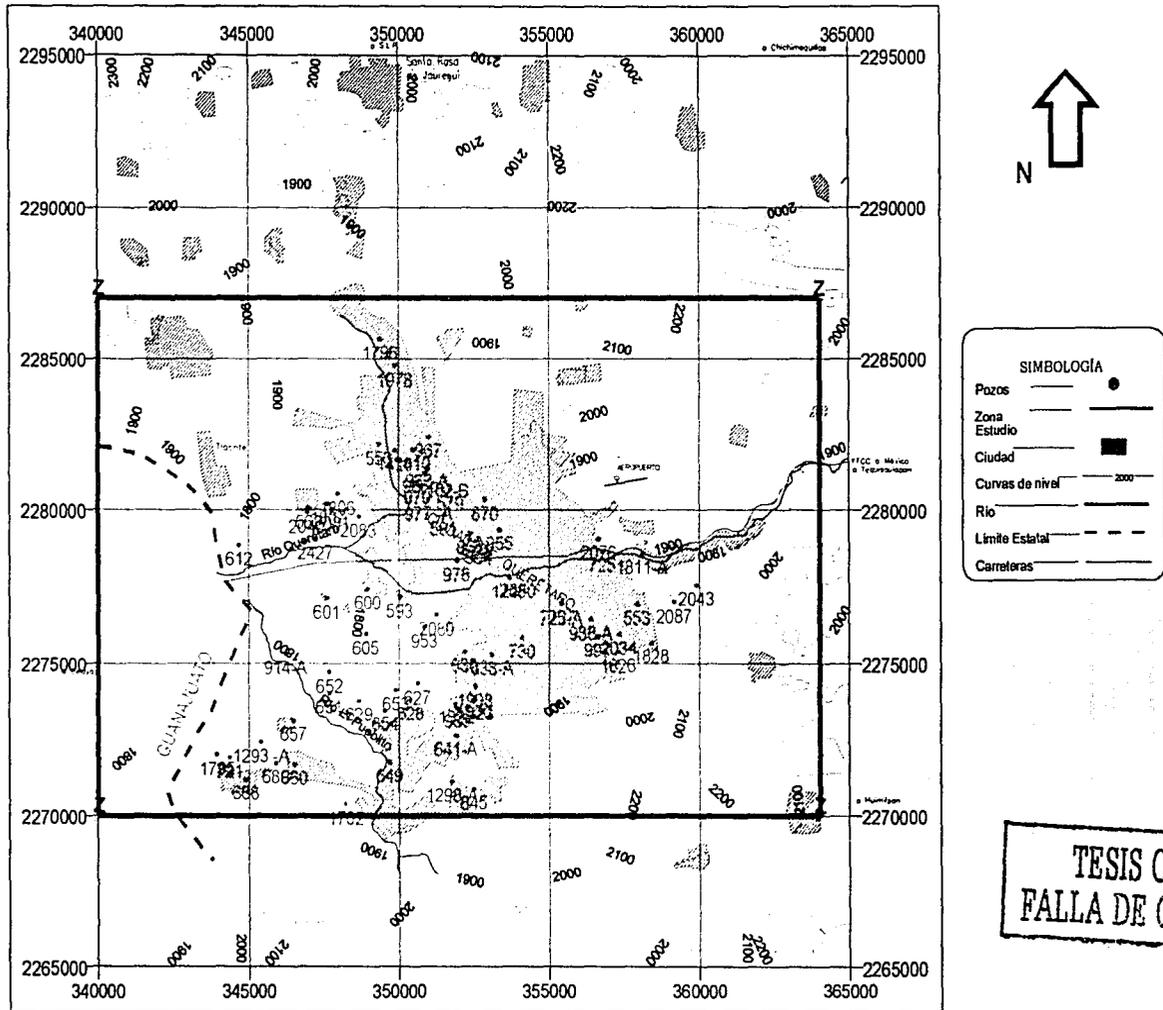


Fig. 2.1 Localización de pozos con corte litológico



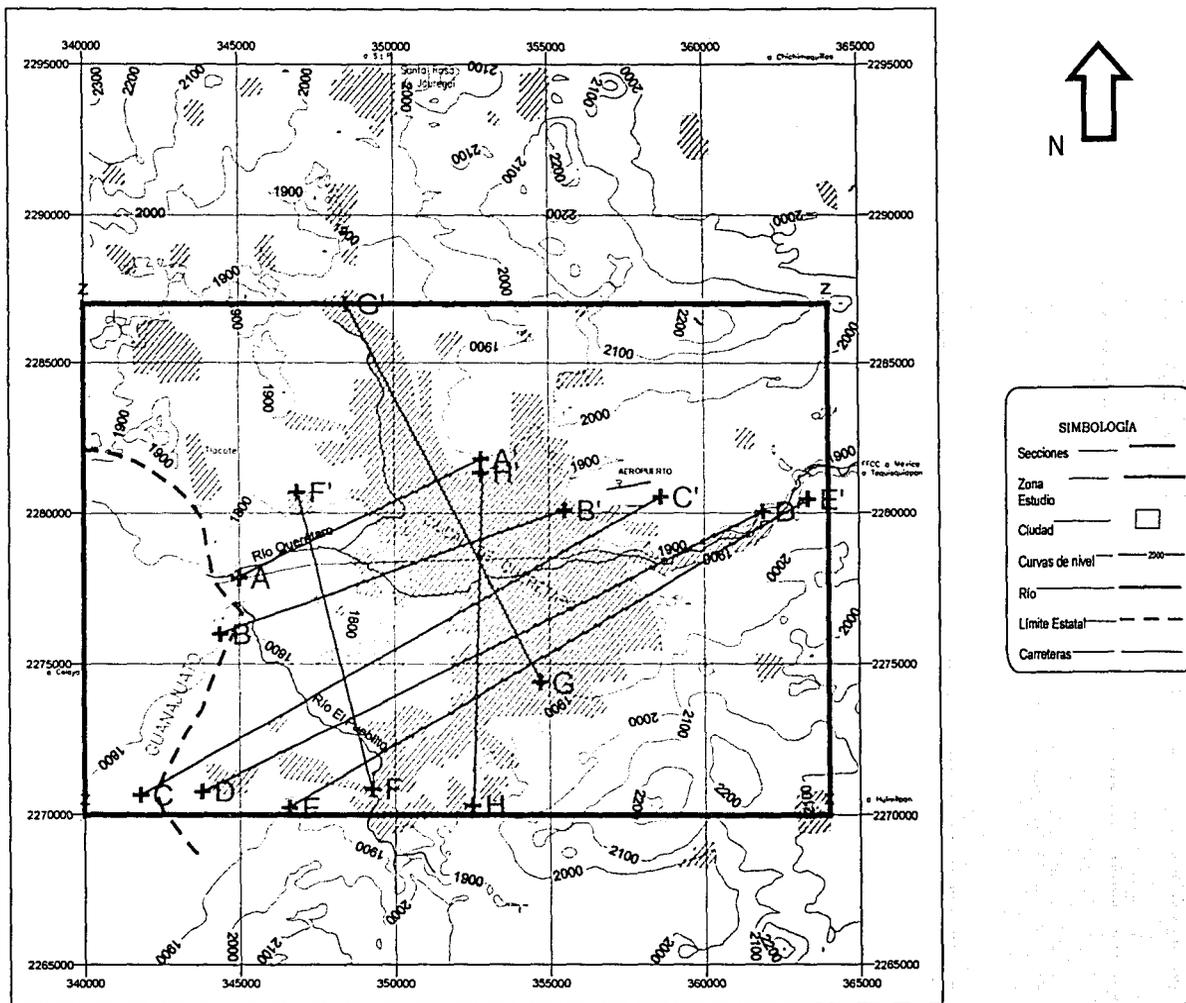


Fig. 2.3 Localización de secciones elaboradas

## CAPITULO III.

### MARCO GEOLÓGICO DE REFERENCIA.

#### 3.1 Fisiografía.

La zona estudiada se encuentra enclavada en la porción septentrional de la provincia fisiográfica denominada **Eje Neovolcánico**, (INEGI, 2001). Esta provincia colinda al norte con la Llanura Costera del Pacífico, la Sierra Madre Occidental, la Mesa Central, la Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo Norte; al sur, con la Sierra Madre del Sur y la Llanura Costera del Golfo Sur. Por el oeste llega al Océano Pacífico y por el este al Golfo de México. Abarca parte de los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Colima, Puebla y Veracruz, así como todo el estado de Tlaxcala y el Distrito Federal.

Se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Terciario (unos 35 millones de años atrás) hasta el presente.

La integran grandes sierras volcánicas, coladas lávicas de gran extensión y espesor, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas.

Otro rasgo esencial de la provincia es la existencia de amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos (Pátzcuaro, Cuitzeo, Texcoco, el Carmen, etc.) o por depósitos de lagos antiguos (Zumpango, Chalco, Xochimilco, diversos llanos en el Bajío Guanajuatense, etc. Estos lagos se han formado por bloqueo del drenaje original, debido a lavas u otros productos volcánicos, o por el afallamiento, que es otro rasgo característico de la provincia. Un área rodeada de fallas se hunde y forma una depresión llamada graben que se llena de agua; este es el origen del lago de Chapala.

##### 3.1.1 Subprovincia Fisiográfica.

La zona de estudio se encuentra dentro de lo que es la Subprovincia de las Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (**figura 3.1**), la cual tiene una superficie dentro del estado de 4 774.97 km<sup>2</sup>, lo que representa 42.37% del territorio del estado de Querétaro. Comprende en su totalidad los municipios de Ezequiel Montes, Corregidora y parte de los de Amealco, Huimilpan, Pedro Escobedo, Querétaro, El Marqués, Colón, Cadereyta de Montes y Tolimán.

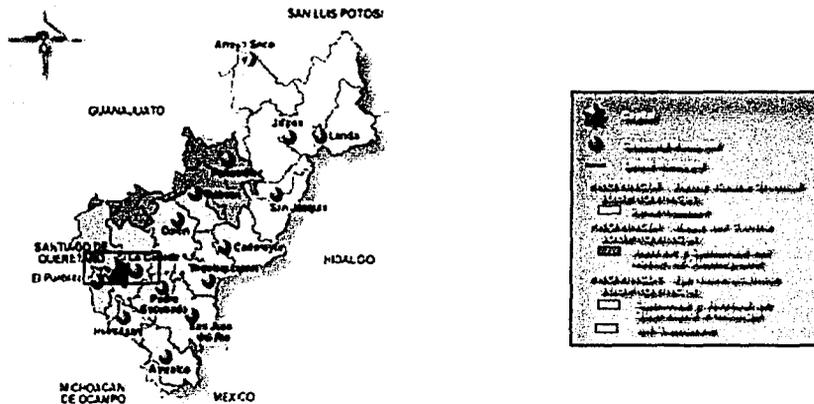


Fig. 3.1 Mapa de Subprovincias Fisiográficas. (INEGI,2000)

Dentro de esta subprovincia fisiográfica en la zona de estudio se definen los siguientes tres sistemas de toposformas que se describen a continuación:

- Sistemas de toposformas Pequeño Llano aislado que abarca gran parte del área de estudio ocupando la parte central desde la ciudad de Querétaro hasta Obrajuelo, la altimetría predominante en el valle es 1800 msnm, presenta una orientación de este-oeste. Su inclinación es 6 a 2° en este rumbo; además es la región donde convergen las principales corrientes superficiales del valle de Querétaro.
- El sistema de toposformas Sierra de laderas tendidas con lomeríos, que se localiza al este del valle de Querétaro, abarca las altitudes comprendidas entre 1900-2400 msnm y la máxima altitud se encuentra en el Cerro del Cimatario (2340 msnm), estas sierras tienen una dirección dominante al norte-sur, laderas de fuerte inclinación y esta compuesta en su mayor parte por rocas volcánicas del Cuaternario.
- El sistema de toposformas Lomerío con colinas redondeadas con llanuras tienen una dirección de este-oeste, se encuentra tanto al norte desde San Pedro Mártir hasta Santa Rosa de Jáuregui como al sur en Villa Corregidora al poblado de Los Olveras. Son de dimensiones menores que las anteriores, presentan una altura menor de 2300 msnm. Con lomeríos de pendiente

fuerte, en las que afloran rocas volcánicas principalmente del Terciario y Cuaternario.

### 3.2 Marco Geológico Regional.

La Faja Volcánica Transmexicana contiene rocas volcánicas de composición variada y cuyas edades van del Mioceno medio hasta el Holoceno, y se ha interpretado como un arco volcánico relacionado con la subducción de las placas Rivera y Cocos bajo la Placa Norteamericana (Ferrari, 2000).

Se encuentran rocas sedimentarias depositadas en el Cretácico Superior en un ambiente marino (**figura 3.2**) (Formación Soyatal).

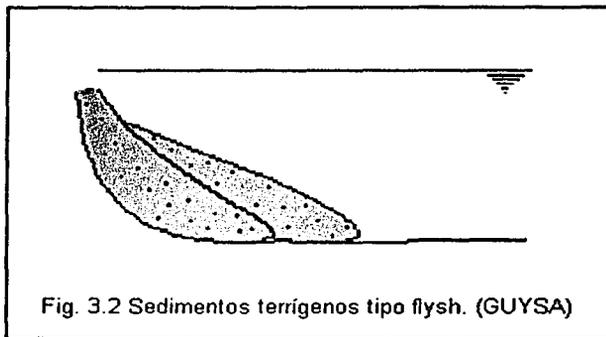


Fig. 3.2 Sedimentos terrígenos tipo flysh. (GUYSA)

A fines de Cretácico Superior y principios del Terciario se inicia una etapa de tectonismo activo en el que se retiran los mares y se generan esfuerzos compresionales que pliegan y deforman a las rocas calcáreas (**figura 3.3**). Estas fueron alteradas por rocas intrusivas que la empujaron hacia la superficie, quedando ambas rocas como testigos de los eventos tectónicos desde principios de Terciario.

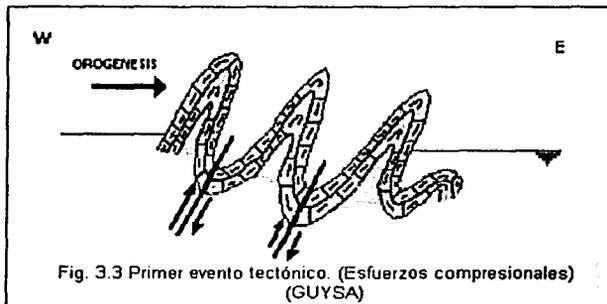


Fig. 3.3 Primer evento tectónico. (Esfuerzos compresionales)  
(GUYSA)

**MODELO GEOELÉCTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO**  
**TESIS PROFESIONAL**

Cubriendo a la formación calcárea se encuentran rocas volcánicas, ácidas, intermedias y básicas asociadas al emplazamiento de la Faja Volcánica Transmexicana.

Con base en varios fechamientos isotópicos (Cerca-Martínez *et al*, 2000), estudiaron entre Celaya y Guanajuato el paso del volcanismo de la Sierra Madre Occidental al de la Faja Volcánica Transmexicana, y documentaron que la actividad volcánica se redujo sustancialmente entre los 22 y los 14.6Ma. Ferrari, y colaboradores, (Ferrari *et al*, 1999), por su parte, documentaron la evolución del arco volcánico de la Sierra Madre Occidental hacia el de la Faja Volcánica Transmexicana y mostraron que la orientación del eje mayor del arco cambió de NNW-SSE en el Oligoceno-Mioceno a E-W en el Plioceno-Reciente.

Dicho evento tectónico de carácter distensivo da origen a la formación de un sistema complejo de fosas y pilares de composición andesítica e ignimbrítica (figura 3.4).

La característica principal de esta etapa es el direccionamiento preferencial NW-SE de la estructuras; a esta etapa corresponden los bajos formados en San Juan del Río, Querétaro y los Apaseos en el estado de Guanajuato; también se asocia a este evento la presencia de rocas intrusivas emitidas a través de las zonas de debilidad. Posteriormente da inicio el relleno de la fosa en un ambiente volcánico y lacustre.

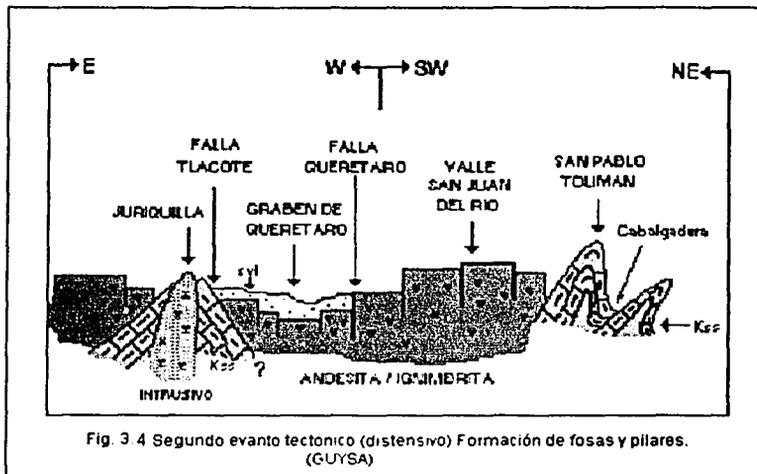
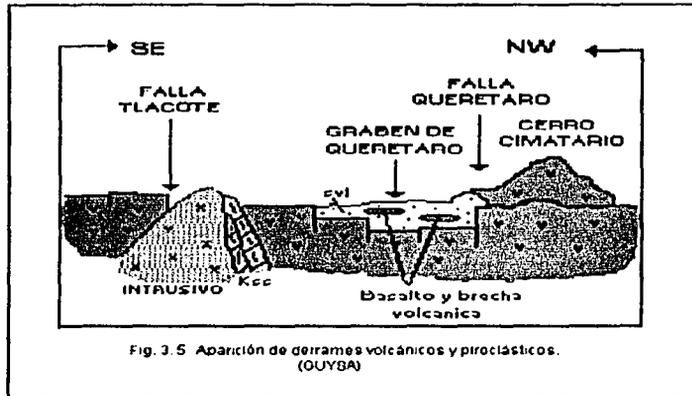


Fig. 3.4 Segundo evento tectónico (distensivo) Formación de fosas y pilares. (GUYSA)

Durante el Plio-Cuaternario se presenta el tercer evento tectónico generando dislocaciones de carácter lateral izquierdo dejando rasgos estructurales con una alineación preferente Este-Oeste (Falla La Cañada y Menchaca). Simultáneamente se presentaban derrames volcánicos y piroclásticos en un ambiente

preponderantemente lacustre. Cabe destacar que en el momento en que ocurrió la comunicación entre el graben de Querétaro con las fosas aledañas, ya existían depósitos lacustres en cada estructura y que por el fallamiento intenso de esta época quedaron conectadas (figura 3.5).



### 3.3 Estratigrafía.

La descripción estratigráfica del área se basa principalmente en el estudio titulado Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México, (Alaniz-Álvarez et al, 2001); así como en el estudio geohidrológico para el valle de Querétaro que la empresa de exploración GUYSA realizó en el año de 1990, en el cual se siguieron las actividades de cartografía, secciones geológicas y muestreo de cada una de las unidades que conforman la zona de estudio, además, se realizaron análisis petrográficos de 100 muestras recolectadas de las unidades que conforman el área del valle de Querétaro; las descripciones detalladas de las unidades sirvieron como base para el presente trabajo.

Dicha empresa de exploración, tomando como base los estudios regionales y en ausencia de una nomenclatura formal que relacionara la litología con el tiempo geológico, realizó para las rocas volcánicas del área una columna litológica que se basa exclusivamente en la posición relativa de los depósitos, ya que no han sido definidas formalmente como formaciones.

La nomenclatura utilizada en el presente trabajo se basa en el trabajo de GUYSA y en la geología cartografiada por Pasquaré y colaboradores, (Pasquaré et al, 1991); Valdéz-Moreno et al. (1998); Vasallo et al. (1998); Nieto-Samaniego et al.

(1999h,1999e); y Reyes-Zaragoza (2001); por lo que se presentan ambas nomenclaturas.

Sin embargo, por cuestiones prácticas, en las secciones finales se utiliza únicamente la nomenclatura propuesta por GUYSA.

En la **figura 3.6** puede observarse el mapa geológico de la zona de estudio.

Se describen a continuación siete unidades rocosas, desde la más antigua a la más reciente.

### **MESOZOICO.**

#### **□ Caliza y lutita (Kica) (Kss).**

**Nombre de la formación:** Soyatal

**Definida por:** Wilson et. al. (1955)

**Descripción:** Paquete mesozoico formado por caliza con intercalaciones de arenisca calcárea, marga y lutita. Presenta bandas de calcita café claro y blanquecina. Las lutitas se encuentran sumamente plegadas presentando gran fisilidad y clivaje.

Contacto con Dacita porfídica a manera de intrusión dentro de las capas de caliza y lutita.

**Localización:** Afloran fuera del área de estudio, en el poblado de Juriquilla, sobre una superficie burdamente semicircular de unos 7 km<sup>2</sup> aproximadamente.

**Relación estratigráfica:** Se desconoce la unidad sobre la cual yace la secuencia mesozoica, se la observa cubierta en discordancia por sedimentos continentales conglomeráticos o por las rocas volcánicas oligocénicas del área.

**Edad:** Su edad ha sido determinada por su contenido fósil en el afloramiento de San Miguel de Allende, donde Chiodi et al.(1988) reportaron una amonita de edad Aptiana-Albiana.

### **OLIGOCENO.**

#### **□ Andesita El Cedro (ToA) (A).**

**Definida por:** Echegoyén-Sánchez et al. (1970) y denominada Andesita Presa de Manantiales por Nieto-Samaniego (Nieto Samaniego A.F, 1990).

**Descripción:** La unidad consiste principalmente de lavas y contiene algunas tobas; su composición varía de basalto a andesita. Su espesor es muy variable, en algunos lugares supera los 100 m.

Tiene texturas desde muy porfídicas a porfídicas de matriz microcristalina, las coloraciones van de gris rojizo a gris rosado, presenta fracturamiento en todas direcciones, densa y masiva, con fuertes alteraciones de tipo supergénico, y muy fuertes alteraciones por procesos hidrotermales con reemplazamientos.

En algunas localidades, esta unidad se encuentra muy alterada; estudios de lámina delgada reportan que su textura es afanítica poco porfídica, microlítica, holocristalina, intergranular, con coloración café gris verdosa.

Se presenta alterada con formas concéntricas y esferoidales, en algunos casos, dentro de esa alteración se detectan rellenos de zeolitas, con tamaños que van de 0.05 a 3 cm, compuestos por carbonatos o por sílice; en otros casos se encuentra con una mineralización incipiente una capa de sílice coloidal, a veces con superficie botroidal, verde azulada relleno de fracturas.

Se observa también un cierto grado de metamorfismo o metasomatismo de rango sumamente bajo, como queda indicado por la presencia de clorita, sericita y epidota; en este caso la epidota indica un remplazamiento por sustitución hidrotermal de la plagioclasa e indica un metasomatismo o diferenciación metamórfica que la asocia al emplazamiento de cuerpos endógenos o diques.

**Localización:** Afloramientos fuera del área de estudio. Se observa en el camino que va del poblado El Nabo hacia la Hacienda San Miguelito. Al sureste de este afloramiento se presentan otras exposiciones de rocas andesíticas que conforman el cerro La Gallina y el poblado de Mompaní y sobre la carretera que va de Jurica al poblado El Nabo.

**Relación estratigráfica:** Es evidente que estas rocas se depositaron sobre una superficie muy irregular, ya que se las observa descansando directamente sobre la secuencia mesozoica y en ocasiones, intercalada con lavas y rocas piroclásticas de composición ácida, o bien yaciendo sobre un conglomerado polimíctico.

**Edad:** La edad que se le asigna es Oligoceno medio, basada en los fechamientos K-Ar de la Andesita El Cedro obtenidos por Cerca-Martínez et al. (2000) de  $30.6 \pm 0.4$  Ma.

## OLIGOCENO – MIOCENO.

### □ Ignimbrita Oligo-Miocénica (Tig) (Ig).

**Descripción:** La litología principal que constituye esta unidad es ignimbrita de composición ácida, presenta grados distintos de piroconsolidación, aunque en mayor proporción se la observa poco soldada. Las ignimbritas se intercalan con depósitos tobáceos y con vitrófidos, su espesor máximo fue estimado en 200 m, pero comúnmente no supera los 100 m.

Dentro de esta unidad se encuentra un afloramiento de un vitrófido muy local, de pequeña extensión, cerca de la localidad del Nabo que ha sido clasificado petrográficamente como ignimbrita riolítica.

**Localización:** Se localizan algunos afloramientos de poca extensión en las localidades de El Nabo, sobre el arroyo Mompaní, y en La Cañada de la Virgen (localidades fuera del área de estudio).

**Relación estratigráfica:** Es posible encontrar a esta unidad subyaciendo discordantemente tanto a unidades basálticas, tobas líticas así como a sedimentos vulcanolacustres.

**Edad:** Su edad se ubica en el Oligoceno tardío. Nieto-Samaniego y colaboradores, (Nieto Samaniego et al, 1996) reportaron fechas isotópicas de esta unidad realizadas por el método K-Ar en separados de sanidino; una de ellas se realizó en las capas inferiores de la secuencia ignimbritica que aflora en la Cañada de la Virgen dando  $28.6 \pm 0.7$  Ma.

### □ Dacita Obrajuelo (TDo) (Bl).

**Descripción:** Se nombra Dacita Obrajuelo (Alaniz-Álvarez et al. 2001) a las rocas volcánicas efusivas que afloran a manera de domos y que forman un amplio tren estructural de dirección NE.

Estas rocas son de color rosa y ricas en fenocristales de andesina, contienen además feldespatos potásico, biotita y relictos de anfíbol.

López-Hernández, (López Hernández A, 1996) les dio el nombre de Riolita Obrajuelo, sin embargo (Alaniz-Álvarez et al. 2001) la denominan Dacita por su bajo contenido de cuarzo y la composición de las plagioclasas.

Los domos alcanzan alturas entre 150 y 200 m desde su base hasta la cima. Por su distribución, posición estratigráfica, y mineralogía, en esta unidad se incluye a un

cuerpo ígneo de textura porfídica y composición intermedia que aflora en Juriquilla.

La distribución de esta unidad se ha restringido del valle de Querétaro únicamente,

**Localización:** Esta unidad aflora en diferentes lugares y en diversas dimensiones fuera del área de estudio. De norte a sur, se presentan en la Tinaja de la Estancia, en San Miguelito y al poniente de Santa Rosa de Jáuregui, en San Isidro el Viejo, al norte de Mompaní y el Nabo y al sur de Tlacote El Bajo.

En algunas zonas existen afloramientos con un espesor de 2 a 4 m pero en otras no se ha podido medir ya que está expuesto en cortes de más de 10 a 20 m sin encontrarse expuesta su base; forma buenos bancos para material de agregados pétreos.

**Relación estratigráfica:** Sobreyace en forma discordante a la Andesita El Cedro y es posible encontrarlo subyaciendo tanto a tobas líticas como a sedimentos volcanolacustres; pero también es posible encontrar contactos laterales interdigitados con estos.

**Edad:** Se le asigna tentativamente una edad entre el Oligoceno y el Mioceno medio.

## **MIOCENO**

### **□ Volcanoclástico Querétaro (TmTq) (Tl).**

**Descripción:** Se denomina así a los depósitos fluviales, aluviales, lacustres y piroclásticos no consolidados y compuestos principalmente de fragmentos de pómez y otros materiales volcánicos, que se encuentran cartografiados en la al norte de la Ciudad de Querétaro. Los mejores afloramientos están en las canteras ubicadas en los escarpes de las fallas, su espesor es variable, el máximo espesor medido fue de cerca de 100 m en la autopista México-Celaya.

En las cercanías de la ciudad de Querétaro, algunas capas contienen más de 80% de clastos de pómez de varios centímetros de diámetro, son de color claro, y están intercaladas con sedimentos lacustres arenosos. En Mompaní se observaron areniscas de color café claro bien estratificadas intercaladas con limolitas. En algunos bancos de material están expuestos horizontes con pómez blanca con abundantes cristales de biotita muy bien preservados. En el extremo noreste del valle de Querétaro, se observó que bajo los basaltos aflora una toba de caída libre compuesta por pequeños fragmentos de tamaño uniforme de pómez de color oscuro.

**Localización:** Esta unidad quedó al descubierto por el fallamiento distensivo de La Cañada y Tlacote y aflora una mínima parte en el área de la localidad de Menchaca, en las laderas de La Cañada sobre el cauce del Río Querétaro, y al suroeste del Nabo sobre el arroyo Mompaní. También se reportó en el subsuelo en los cortes litológicos de los pozos 2041 (Agua Potable. El Nabo) y 759 (Ejido El Nabo) localizados fuera del área de estudio.

**Relación estratigráfica:** Esta unidad se encuentra subyaciendo al Basalto Querétaro y cubre a la Dacita Obrajuelo y a la Andesita El Cedro.

**Edad:** La formación de estos depósitos está relacionada con el volcanismo del Mioceno medio y tardío. La edad de estos depósitos en el centro del valle de Querétaro se deduce anterior al Basalto Querétaro fechado en  $7.5 \pm 0.5$  Ma (Aguirre-Díaz y López-Martínez, en prensa).

## **MIOCENO-CUATERNARIO**

### **□ Arenisca y Conglomerado cenozoicos (ArCg) (Svl).**

**Descripción:** Se agrupan en esta unidad a los sedimentos aluviales y lacustres que rellenan las depresiones el área de estudio. Las depresiones mayores reconocidas son El Bajío y las cuencas asociadas a las fallas de Querétaro. Estos sedimentos no afloran en las sierras pero sí en las partes bajas, atestiguando que dichos depósitos sedimentarios constituyen el relleno de cuencas continentales. La litología de esta unidad la conforman principalmente areniscas y conglomerados. En Querétaro y El Bajío, casi toda la unidad está cubierta por suelo debido a que se trata de planicies.

Dentro de estos depósitos se encuentran intercaladas coladas de lavas andesíticas y/o basálticas de espesor variable, que van desde unos pocos hasta algunas decenas de metros.

Los espesores de estos sedimentos son también de pocos hasta algunos cientos de metros; 340 m en el pozo 1978 (Loma Bonita) y probablemente más de 500 m en la parte central del valle de Querétaro (pozo Santa María Magdalena número de censo 2427).

Estos depósitos existen prácticamente en toda el área estudiada y representa el proceso exógeno mas extenso ya que relleno el graben de Querétaro hasta formar la planicie; de hecho estos materiales forman el acuífero granular del valle. Los materiales son ampliamente utilizados como bancos de préstamo para fabricación de tabique ligero y rellenos de carreteras y otro tipo de construcciones, existiendo innumerables excavaciones profundas.

**Relación estratigráfica:** Estos sedimentos se encuentran interdigitados con diferentes eventos volcánicos; se encuentran debajo de las coladas basálticas de gran extensión superficial en la zona central; debajo de horizontes bien definidos de tobas líticas y brechoides principalmente hacia la parte sur, también de gran extensión horizontal y sobre las rocas que se consideraron como el basamento de vulcanismo calcoalcalino (andesitas y dacitas).

**Edad:** Plioceno al Reciente.

### **MIOCENO-PLEISTOCENO.**

#### **□ Basalto Querétaro (TaB) (B).**

**Descripción:** Se agrupa en esta unidad a los derrames fisurales, aparatos centrales y conos cineríticos, de composición basáltica, del Mioceno tardío. Pasquaré et al. (1991) los incluyen en la Secuencia Máfica de Querétaro y López-Hernández (1996) los denomina también Basalto Querétaro.

Se han descrito numerosos afloramientos en forma megascópica de esta unidad y se han clasificado como basalto de olivino negro, con texturas afanítica, holocristalina, microlítica, glomero-porfídica e intergranular muy denso y pesado. También se interdigita y confunde con las series volcánicas calcoalcalinas anteriores como la andesítica alterada.

Los espesores en las mesas son de 1 a 3 m, no así para los detectados dentro del valle entre los depósitos aluviales cuaternarios en donde sobrepasan las decenas de metros en algunos casos.

En esta unidad se agrupan los siguientes eventos volcánicos:

- (a) Los derrames del norte del valle de Querétaro, que provienen de una colada de basalto de más de 4 km de longitud proveniente del dique El Patol, reconocido por la alineación de siete conos.
- (b) El Cerro Grande de Santa Cruz, el cual es un volcán escudo cuyas lavas se observan esparcidas más de 10 km hacia el oriente, mientras que hacia el sur y el poniente las lavas están cortadas por fallas.
- (c) El volcán El Cimatario, también de composición basáltica, ubicado en el extremo surponiente del valle de Querétaro.
- (d) Otras fuentes de emisión menores que formaron las mesetas del centro y sur de Querétaro, las cuales comúnmente se ubican en la intersección de dos sistemas de fallas.

**Localización:** Es la unidad que conjuntamente con los depósitos aluviales conforman la mayor parte de los afloramientos presentes en la zona de estudio; forma extensas mesetas coronadas por coladas lávicas, terminadas en pequeños cantiles de 1 a 5 m de espesor con una fisonomía característica de grandes bloques cúbicos.

**Relación Estratigráfica:** El Basalto Querétaro sobreyace al Volcaniclástico Querétaro, a la Andesita El Cedro y a la Dacita Obrajuelo y subyace a los depósitos sedimentarios aluviales y lacustres que rellenan la fosa de Querétaro. Coladas pertenecientes a esta unidad se encuentran intercaladas con los depósitos aluviales del valle de Querétaro.

**Edad:** Se considera como el último de los eventos de vulcanismo de naturaleza básico alcalino surgido entre el Pleistoceno y Holoceno.

Los basaltos han sido fechados en  $8.10 \pm 0.8$  Ma, en las cercanías del aeropuerto de la ciudad de Querétaro Pasquarè et al.(1991), en  $7.5 \pm 0.5$  MA al norte de Querétaro Aguirre-Díaz y López-Martínez, (en prensa), en  $6.2 \pm 0.6$  Ma en el derrame proveniente del dique El Patol Valdez-Moreno et al. (1998) y en  $5.6 \pm 0.4$  Ma en el volcán Cimatarío Aguirre-Díaz y López-Martínez (en prensa).

#### □ **Aluvión y/o suelo residual (Al/Sr)**

**Descripción:** Su litología está constituida por gravas y boleos en matriz arcillosa, limosa y arenosa, con espesores de unos cm hasta unos 70 u 80 m detectados en la zona central del valle.

**Localización y Relación estratigráfica:** El aluvión constituye propiamente al valle de Querétaro, forma la gran planicie del centro. Por otro lado el suelo residual se encuentra generalmente sobre casi todo tipo de rocas, con mayor abundancia sobre terreno basáltico, por ello se utilizan para tierra de cultivo ya que permite la infiltración del agua de lluvia a estratos inferiores.

### **3.4 Geología Estructural.**

#### **3.4.1 Marco Tectónico Regional.**

Con base en la estratigrafía, geología estructural y fechamientos isotópicos se ha determinado que la región de estudio estuvo sometida al menos a cuatro eventos de deformación extensional, siendo el primero y el último sincrónicos con la deformación oligocénica de la Mesa Central y pliocénica reciente de la Faja Volcánica Transmexicana, respectivamente.

El primer evento tectónico denominado Revolución Laramide, se desarrolló al finalizar el Cretácico cuando las rocas carbonatadas fueron plegadas y afalladas con movimientos compresivos. El resultado fue una serie de estructuras anticlinales, sinclinales y cabalgaduras dirigidas al NNW que han sido erosionadas dejando al descubierto remanentes erosivos. Asociadas a estas deformaciones se incluye la presencia de rocas intrusivas que surgieron a principios del terciario entre las fisuras y planos afallados de la formación sedimentaria. Estas estructuras no afloran en el área de estudio.

Posteriormente al Mioceno se presentó un evento volcánico andesítico e ignimbrítico silíceo que cubrió grandes extensiones rellenando valles así como zonas antiguas topográficamente altas. Estas unidades de roca fueron afectadas por el segundo fenómeno tectónico de la región (Oligoceno), que generó una serie fosas y pilares entre los que destaca el de Querétaro, delimitada tanto en la porción oriental como occidental por fallas normales denominadas (GUYSA, 1990) Fallas Querétaro, Tlacote y Obrajuelo (esta última localizada al poniente fuera de la zona de estudio. La tendencia regional NW-SE de estos grandes lineamientos fue provocadas por esfuerzos distensivos.

En el Plioceno, al desarrollarse el Cinturón Volcánico Transmexicano, la etapa básica e intermedia marcó el fin del Terciario con algunos focos distribuidos en el área, en donde se presentó el tercer evento tectónico generando dislocaciones de carácter lateral izquierdo asociado también a fallamiento normal. Estas estructuras tienen dirección preferencial E-W y están representados en área de estudio en la Falla La Cañada, Falla Menchaca y una serie de lineamientos menores con el mismo rumbo.

### **3.4.2 Estructuras Regionales.**

La región de estudio se caracteriza por presentar fallas de edad cenozoica, algunas de ellas forman depresiones topográficas que constituyeron cuencas de depósito; todas las fallas cortan unidades estratigráficas de edad terciaria.

En la **figura 3.7** se presenta el esquema tectónico regional.

A continuación se describen las principales estructuras.

#### **ESTRUCTURAS NW-SE.**

##### **□ Graben de Querétaro.**

Corresponde a un extenso valle de forma poco alargada en dirección noroeste - sureste formado en el Oligoceno-Mioceno (**fig 3.7**). Se encuentra relleno de sedimentos aluviales, flujos de lava y depósitos volcanoclásticos lacustres potentes.

Estos materiales están parcialmente saturados de agua y forman el acuífero del valle de Querétaro.

□ **Falla Querétaro.**

La falla Querétaro es de tipo normal, tiene una longitud total de 61 km, se localiza paralelamente a la carretera Querétaro-San Luis Potosí y posiblemente se inicia en la parte sur de Santa Rosa de Jáuregui.

Puede ser dividida en tres sectores, en el sector norte, la falla es evidenciada por el límite poniente del alto topográfico entre San José Iturbide y Santa Rosa de Jáuregui (fuera del área de estudio) . El escarpe tiene una orientación N-S y se extiende por más de 10 km, poniendo en contacto ignimbritas riolíticas y basaltos del Mioceno medio, con depósitos sedimentarios pertenecientes a la unidad de Arenisca y Conglomerado cenozoicos. La actividad de este sector debió ser posterior al Mioceno medio, que es la edad de los basaltos desplazados.

El sector central de la falla Querétaro, con 15 km de largo, no muestra un escarpe bien desarrollado, aunque en su extremo meridional produjo un desplazamiento vertical de 50 m en lavas del volcán Santa Cruz. Desde el norte de El Salitre, hasta Santa Rosa de Jáuregui, la falla es sugerida por la alineación de fuentes de emisión volcánica del Basalto Querétaro y de la Dacita Obrajuelo y desniveles topográficos menores, sin que se observe un escarpe de falla.

La falla Querétaro-sur, con traza de 25.5 km de largo, muestra una orientación N22°W y ángulo alto. Esta falla corta a los Basaltos Querétaro y expone al Volcaniciclástico Querétaro a lo largo de su escarpe. La roca más joven desplazada por esta falla corresponde a las lavas del volcán Cimatario.

El desplazamiento vertical promedio es de 80 m.

□ **Falla Tlacote.**

Atraviesa el poblado de Tlacote El Bajo hacia el norte y el poblado de Balvanera hacia el Sur; también presenta un desplazamiento al oriente, siguiendo su dirección, del poblado La Negreta a Puerta de San Rafael.

Es de tipo normal, su escarpe se observa por más de 20 km . Está constituida por dos segmentos separados por la falla Buenavista (GUYSA,1999), con orientación ENE-WSW, cuya expresión topográfica y relaciones de corte indican que es anterior a la falla Tlacote.

El desplazamiento vertical fue de 80 m. Tanto en el bloque levantado como en el hundido se encuentra el Basalto Querétaro. La edad de actividad de esta falla es más joven que 7.5 Ma.

## **ESTRUCTURAS E-W.**

Dentro y fuera del área de estudio se observa un sistema de estructuras E-W compuesto por fallas normales y alineamientos de fuentes de emisión volcánica. Las fallas cartografiadas están constituidas por segmentos de fallas normales de ángulo alto, con longitudes menores que 15 km y con escarpes que varían de 30 a 100 m.

Dicho sistema se formó anterior al Oligoceno medio y, posteriormente, la deformación fue sincrónica con el volcanismo de las fases tempranas de la Faja Volcánica Transmexicana.

En el área de estudio se encuentra las siguientes estructuras.

### **□ Falla La Cañada.**

Se trata de un lineamiento formado en el Plioceno, que corta en forma transversal al graben de Querétaro desde la localidad de La Cañada, y se continúa al poniente por La Calera de Obrajuelo y Calera de Ameche en el estado de Guanajuato. De hecho, esta falla dio origen al cauce del Río Querétaro.

### **□ Falla Menchaca.**

Se encuentra situada al norte de la falla La Cañada, es de menor extensión pero conserva las mismas características que ésta.

Fuera del área de estudio se encuentran las siguientes estructuras:

### **□ Falla Corregidora.**

La falla Corregidora está compuesta por varios segmentos con orientación N70°E y con longitudes de aproximadamente 5 km, estas estructuras cortan al volcán Cimatario y a la falla Tlacote (**figura 3.7**).

El relieve del escarpe que se observa en la falla al sur del volcán Cimatario es el más pronunciado; en el bloque hundido se depositaron sedimentos lacustres y aluviales y su desplazamiento se estima mayor que 100 m.

Hacia el norte de la zona de estudio, se pueden identificar la Falla Buenavista y la Falla Santa Rosa, las cuales presentan un rumbo paralelo; no se cuenta con más información.

## HIDROGEOLOGÍA.

### 3.5 Características Hidrogeológicas de las formaciones.

La disposición espacial de las unidades litológicas puede ser agrupada en medio poroso y medio fracturado, los cuales integran el sistema que controla el movimiento del agua subterránea en la zona de estudio, lo cual constituyen un sistema acuífero de tipo libre y en algunas localidades semiconfinado.

El acuífero es heterogéneo ya que lo integran varios tipos de rellenos, las variaciones litológicas se presentan tanto en sentido horizontal como en el vertical, además de presentarse secuencias mezcladas repetitivamente entre derrames volcánicos y depósitos granulares (GUYSA, 1999).

#### MEDIO POROSO.

**Litología:** Depósitos aluviales Terciarios, tobas arenosas y sedimentos vulcanolacustres del Cuaternario.

**Distribución y espesor:** Se encuentran rellenando la Fosa Tectónica de Querétaro. Por el lado norte se localizan desde las inmediaciones de Jurica hasta el frente volcánico de la sierra que divide al valle de Querétaro con el de Huimilpan en la porción sur. Por el lado oriental esta unidad se localiza entre los estrechamientos estructurales de La Cañada, Cuesta China y Menchaca y por el poniente, limita con una línea imaginaria paralela a la división estatal con Guanajuato.

Los espesores son variables dependiendo de la localidad de que se trate, encontrándose alternado a profundidad, pero con diferentes granulometrías, intercalados e interdigitados con varias secuencias de derrames volcánicos. El espesor varía según la localidad que se trate, pero la mayoría de los pozos de la zona centro y oriente del valle, están perforados en estos depósitos; los pozos 2081 (San Pedro Mártir 4) y el pozo 2083 (Santa María Magdalena 2) presente en la sección B-B'; por ejemplo, han cortado 350 metros de estos materiales por lo que se infiere que es en esta área donde se presenta la mayor profundidad del graben, sin excluir otras no menos profundas como Jurica y la parte suroeste de Villa Corregidora las cuales se encuentran fuera del área de estudio.

**Características hidrogeológicas:** Se conoce que la conductividad hidráulica de los medios porosos está en función de su distribución granulométrica. Los depósitos aluviales y vulcanolacustres presentan los valores mas altos de conductividad hidráulica, pero dentro de estos últimos, se presentan una serie de horizontes arcillosos dispuestos indistintamente dentro de la planicie, los cuales afectan el valor de dicha conductividad debido a su poca permeabilidad.

## **MEDIO FRACTURADO.**

**Litología:** Andesitas, andesitas alteradas, ignimbritas y riolitas del Terciario y basaltos, brechas volcánicas y tobas líticas y vítreas del Cuaternario.

**Distribución y espesor:** Este medio geológico se encuentra intercalado e interdigitado con depósitos lacustres.

Las áreas de afloramiento son en general las partes más altas topográficamente. En la porción sur del área se localizan únicamente dos afloramientos al noreste de la localidad de Los Olveras ubicado fuera del área de estudio.

**Características hidrogeológicas:** La secuencia volcánica presentan gran heterogeneidad en la distribución de sus propiedades hidráulicas, debido a la densidad del fracturamiento. El sentido y dirección del fracturamiento ocasiona que la conductividad hidráulica vertical pueda ser mayor que en el sentido horizontal.

El medio fracturado es permeable aún encontrándose encima del nivel de saturación, lo anterior se debe al grado y calidad de fracturamiento, limpio y abierto, generando buena permeabilidad entre fracturas; además funciona como recarga al acuífero desde la superficie.

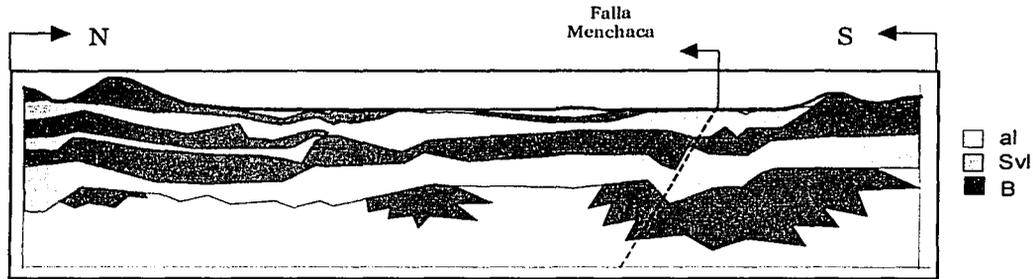
Por lo que toca a las rocas de origen marino del Cretácico y a las rocas intrusivas, estas no han sido detectadas en pozos, observándose únicamente en superficie en las vecindades de Jurica, donde por la falta de información no se puede definir su comportamiento hidráulico en el subsuelo.

### **3.6 Geología del Subsuelo.**

Una vez que se definió que las unidades litológicas presentes dentro del área de estudio pueden dividirse según su comportamiento hidrogeológico en medio poroso y medio fracturado, uno de los objetivos principales del trabajo es pues, la delimitación espacial de dichos medios; para ello se diseñaron nueve secciones geológicas basadas, en una primera aproximación, en información de cortes litológicos. En la **figura 2.3** se observa su localización.

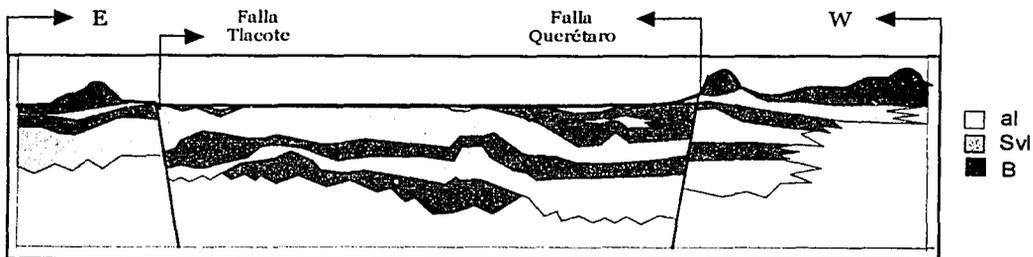
Es conocido que las correlaciones litológicas entre pozos de una provincia volcánica presenta dificultades por las discontinuidades laterales características de estos terrenos; para una correcta interpretación es necesario el uso de la Geofísica como una herramienta; por ello, las secciones se evaluaron conjuntamente con la información de resistividad proveniente de sondeos eléctricos verticales SEV, los resultados se presentan en el capítulo V.

Sin embargo, para fines de este capítulo se establecen dos modelos conceptuales esquemáticos con direcciones arbitrarias Norte – Sur y Este – Oeste.

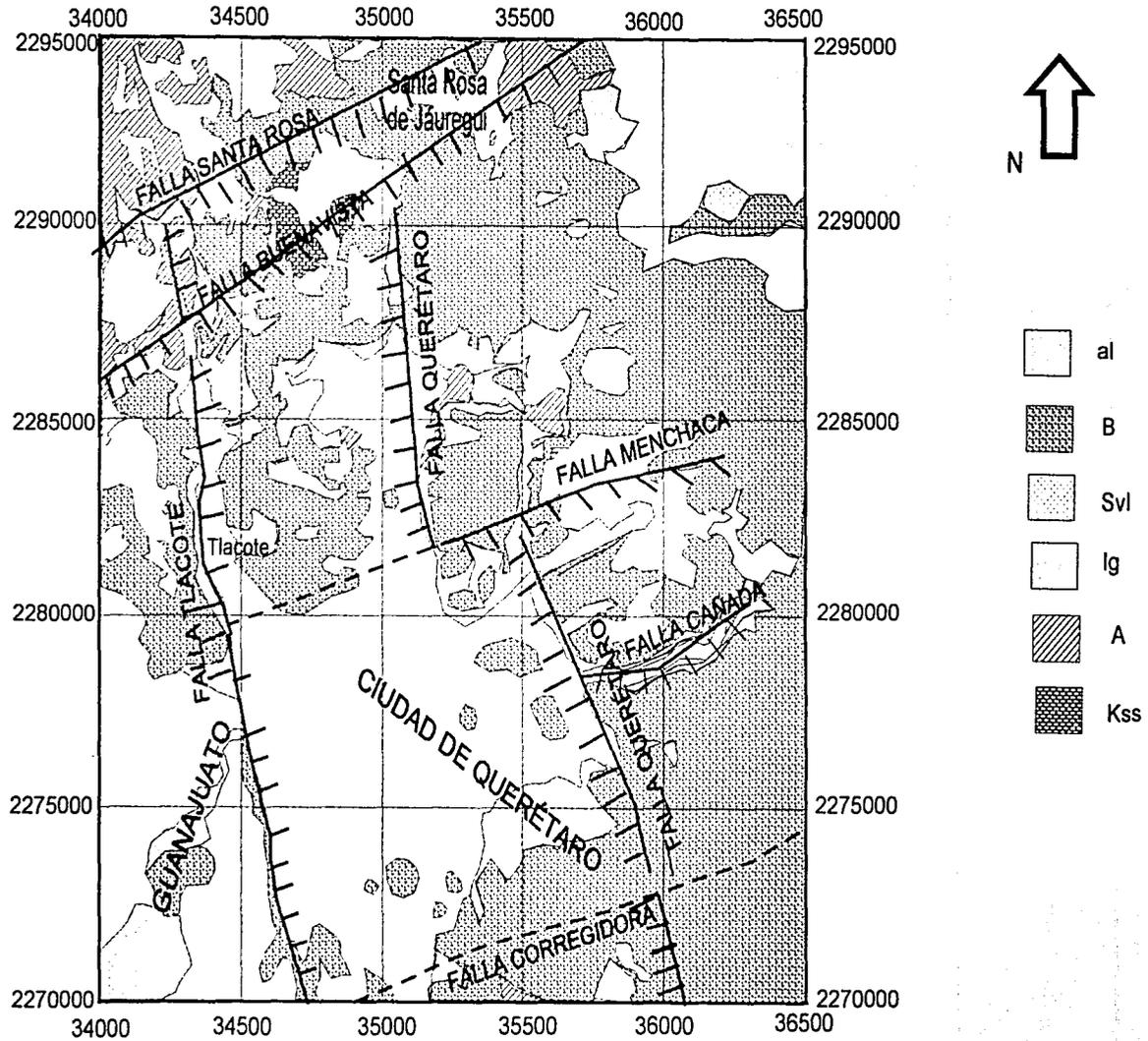


La característica principal que se observa en el modelo geológico esquemático N-S (fig 3.8), es la intercalación de sedimentos volcanolacustres, en la figura representados por el color naranja, con coladas basalto – andesíticas en diferenciadas con morado.

La falla Menchaca no aflora en superficie, por lo que es inducida mediante la información de los pozos.



Los modelos conceptuales planteados reflejan lo que se espera obtener mediante el uso de la herramienta geofísica de los sondeos eléctricos verticales SEV.



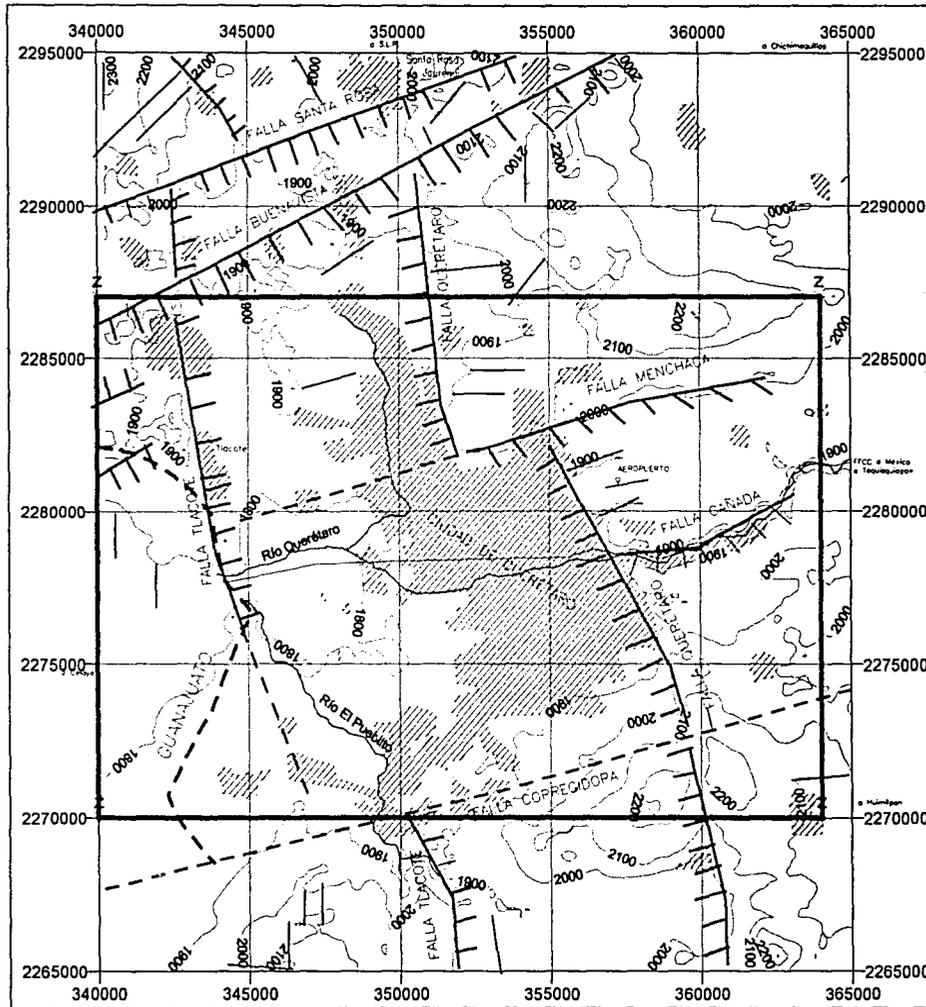


Fig. 3.7 Esquema tectónico regional. (GUYSA 1999)

## **CAPITULO IV.**

### **MODELO GEOELÉCTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO.**

El método geofísico empleado para la generación del modelo para el acuífero superficial del valle de Querétaro fue el método eléctrico en la modalidad de Sondeos Eléctricos Verticales, con arreglo electródico tipo Schlumberger.

Los métodos resistivos emplean una fuente artificial de corriente, la cual es introducida al subsuelo a través de electrodos. El procedimiento consiste en medir la diferencia de potencial existente entre otros electrodos previamente dispuestos en las vecindades del flujo de la corriente.

El trabajo consistió en la recopilación, digitización y reinterpretación de los datos de campo de los 52 sondeos seleccionados, no implicó trabajo de campo. Sin embargo, es necesario plantear los fundamentos básicos que sustentan el método eléctrico así como los principios necesarios para la interpretación.

#### **4.1. Fundamentos Físicos.**

La prospección eléctrica, o bien, el método geoelectrico de resistividad, se basa en la realización de mediciones en la superficie del terreno, con el fin de determinar la distribución bidimensional de la resistividad de las rocas del subsuelo.

La resistividad eléctrica está definida como la dificultad, oposición del medio a la propagación de una corriente eléctrica. Las unidades en las que se expresa son  $\Omega \cdot m$ . Por lo tanto, la resistividad de las rocas es una propiedad física que dependerá de la composición mineralógica de la roca, así como de la cantidad de fluidos que contenga y de la permeabilidad.

Una corriente eléctrica podrá propagarse a través de rocas y minerales de tres formas:

- **Electrónica.** Es la que se da cuando existen electrones libres en los materiales, como es el caso de los metales.
- **Electrolítica.** Se basa en enlaces iónicos o covalentes.
- **Dieléctrica.** Cuando la conducción se da en medios poco conductores. Las rocas son materiales dieléctricos en general, a menos que contengan entre sus poros o fracturas un agente electrolítico. El agente electrolítico más común es el agua.

De esta forma, se puede considerar que las rocas tienen un comportamiento conductivo del tipo electrolítico que dependerá del tipo de agente que se encuentre en sus poros.

Las formaciones rocosas no presentan la misma resistividad, por lo que el método se basa en determinar e identificar los contrastes existentes entre ellas.

Los factores que influyen en la variación de la resistividad en las rocas se enumeran a continuación:

- Inclusión de minerales arcillosos.
  - Porosidad y saturación.
  - Efectos de temperatura.
  - Efectos de presión.
  - Efectos geológicos.

#### **4.2. Teoría del Sondeo Eléctrico Vertical para un semiespacio homogéneo.**

Una forma de simplificar la teoría del método eléctrico, es considerar que el medio en el que se está trabajando es isotrópico, homogéneo y lineal.

Considerando una corriente eléctrica continua que atraviesa un medio con las características antes especificadas, mediante la Ley de Ohm se establece que el campo eléctrico se encuentra relacionado con la densidad de corriente de la siguiente manera:

$$J = \sigma E \quad (1)$$

donde:

J= Densidad de corriente en amperes/metro<sup>2</sup>.

E= Campo Eléctrico en volts/metro.

$\sigma$ = Conductividad del medio en mhos/metro.

De igual manera se establece que el campo eléctrico se comporta como un campo conservativo en un medio estacionario, lo cual puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot E &\neq 0 \\ \nabla \times E &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

(3)

Por lo que el campo eléctrico quedará expresado únicamente por el gradiente del potencial eléctrico  $U$ :

$$E = -\nabla U \quad (4)$$

Bajo un régimen estacionario, el comportamiento de la densidad de corriente  $J$  será:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (5)$$

Sustituyendo a  $J$  por mediante la ecuación (1)

$$\nabla \cdot (\sigma E) = 0 \quad (6)$$

Sustituyendo  $E$  mediante la ecuación (4):

$$\nabla \cdot (\sigma(-\nabla U)) = 0 \quad (7)$$

Por propiedades del producto punto:

$$\nabla \sigma \nabla U + \sigma \nabla^2 U = 0 \quad \text{Ecuación que rige el comportamiento del potencial eléctrico.}$$

Pero al considerar que el medio es homogéneo, lineal e isotrópico, la conductividad eléctrica  $\sigma$  no cambiará:

$$\nabla \sigma = 0 \quad (8)$$

por lo tanto deberá cumplirse la ecuación de Laplace:

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

La variación del potencial eléctrico se observará respecto a la distancia únicamente, por lo que es conveniente utilizar coordenadas esféricas:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) = 0$$

resolviendo:

$$2r \frac{\partial U}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial U}{\partial r} = 0$$

Mediante ecuaciones diferenciales sabemos que la solución es del tipo:

$$U = C_1 - \frac{C_2}{r^2} \quad \text{pero cuando } r \rightarrow \infty \quad U \rightarrow 0 \quad C_1 = 0 \quad U = -\frac{C_2}{r^2}$$

y de (1) y (5):

$$J = \sigma \frac{C_2}{r^2}$$

sabemos además por definición de densidad de corriente:

$$J = \frac{I}{A} \quad \text{Donde } A \text{ es el área de una semiesfera} = 2\pi r^2.$$

Igualando:

$$\sigma \frac{C_2}{r^2} = \frac{I}{2\pi r^2}$$

$$C_2 = \frac{I}{2\pi\sigma} \quad \text{y} \quad U = \frac{I}{2\pi\sigma} \cdot \frac{1}{r}$$

Sustituyendo la conductividad  $\sigma$  por la resistividad  $\rho$ :

$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad \text{Ecuación para el potencial eléctrico producido por una fuente puntual en un medio homogéneo, lineal e isótropo.}$$

Despejando la resistividad:

$$\rho = 2\pi r^2 \frac{U}{I} \quad (10)$$

Pero en la realidad no se trabaja en medios con las características antes descritas, es por ello que es necesario definir la resistividad aparente, que es la resistividad de un medio heterogéneo que se obtiene al aplicar las ecuaciones para medios homogéneos.

$$\rho_a = K \frac{\Delta U}{I}$$

Donde K es el factor geométrico cuyo valor depende del arreglo utilizado.

### 4.3 Interpretación Teórica.

Dentro de la interpretación de sondeos eléctricos verticales, se debe deducir la distribución vertical de resistividades verdaderas suministradas por el SEV. La resolución de este problema, al que se le conoce como problema inverso, exige la previa solución y estudio del problema directo, esto es, el de determinar la curva de resistividades aparentes que se obtendrá con un dispositivo determinado, sobre un subsuelo cuya distribución de resistividades se conoce.

#### 4.3.1 Problema Directo.

El problema directo es resuelto (Orellana, 1981) para una fuente puntual de corriente situada en la superficie, en la frontera tierra aire, y posteriormente, se puede extender por superposición a varias fuentes.

Si se tiene un medio estratificado de  $n$  número de capas donde cada estrato es homogéneo e isótropo (fig. 4.1), se deberá cumplir en cada uno de ellos la ecuación de Laplace, tal como se demostró en el apartado de teoría.

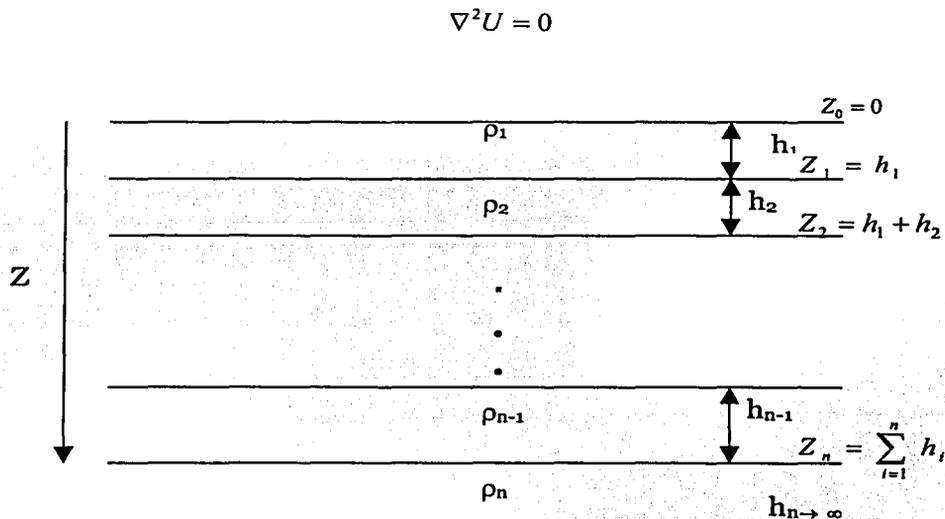


Fig.4.1 Medio Estratificado

El potencial en la superficie puede expresarse en la forma (Koefoed,1979).

$$U = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^{\infty} N_n(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (11)$$

Donde  $N_n(\lambda)$  es la llamada función característica, y es función de los espesores y resistividades del medio estratificado, que puede ser obtenido mediante la aplicación de la relación de recurrencia de Pekeris que se expresa de la siguiente manera (Koefoed,1979).

$$N_i(\lambda) = \frac{K_{i+1}(\lambda) + P_i \tanh(\lambda h_i)}{P_i + K_{i+1}(\lambda) \tanh(\lambda h_i)} \quad (12)$$

$$P_i = \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \quad (13)$$

Si  $n$  es el número de capas se comienza por  $K_n = 1$  y se continúa rebajando el índice hasta  $K_1 = N_n$ .

La resistividad aparente para el dispositivo Schlumberger está dada por :

$$\rho_{a,s} = \pi r^2 \frac{|E|}{I} \quad (14)$$

Donde  $|E|$  es el módulo del campo eléctrico. En la práctica el módulo del campo eléctrico se expresa como:

$$|E| = \frac{\Delta U}{MN} \quad (15)$$

El campo eléctrico se obtiene a partir de derivar la ecuación (11).

$$|E| = -\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{I\rho_1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial r} \int_0^{\infty} N(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (16)$$

$$|E| = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^{\infty} N(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (17)$$

Donde  $J_1(\lambda r)$  es la función de Bessel de primera especie y orden 1.

Sustituyendo (17) en (14).

$$\rho(r)_{a,s} = \rho_1 r^2 \int_0^{\infty} N_n(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (18)$$

Dicha curva representa gráficamente en escala logarítmica, la solución del problema directo, esto es, dando un corte geoelectrico, expresa la serie de valores de la resistividad aparente que se obtendrán con el dispositivo electródico tipo Schlumberger.

Para el estudio de las propiedades de esta función es conveniente efectuar un cambio de variable. Si se hace  $\lambda r = \omega$ , por ser  $r$  constante durante la integración se tiene:

$$\lambda = \frac{\omega}{r}; \quad d\lambda = \frac{d\omega}{r} \quad (19)$$

Entonces,

$$\rho(r)_{a,s} = \rho_1 r^2 \int_0^{\infty} N_n(\omega, r) \frac{\omega}{r} J_1(\omega) \frac{d\omega}{r}$$

$$\rho(r)_{a,s} = \rho_1 \int_0^{\infty} N_n(\omega, r) \omega J_1(\omega) d\omega \quad (20)$$

Considerando las propiedades asintóticas de la función característica:

$$N_n(\omega, 0) = 1 \quad (21)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} N_n(\omega, r) = \frac{\rho_n}{\rho_1}$$

Con esta base pueden demostrarse algunas propiedades de las Curvas de Resistividad Aparente:

- a) **Continuidad.** Siempre que las resistividades del corte sean finitas, la función  $\rho(r)_{a,s}$  es continua. En tales condiciones la Función característica  $N_n(\omega, r)$  está acotada, y puede elegirse una cantidad  $A$  arbitraria, tal que  $A > \text{máx} N_n(\omega, r)$  en cualquier punto del intervalo  $(0, \infty)$ ; entonces:

$$N(\omega, r)\omega J_1(\omega) < A\omega J_1(\omega)$$

y además

$$\int_0^{\infty} A\omega J_1(\omega) d\omega \leq A$$

ya que

$$\int_0^{\infty} x J_1(\omega) dx = 1$$

- b) **Asíntotas horizontales.** La función  $\rho(r)_{a,s}$  tiende respectivamente para  $r \rightarrow 0$  y  $r \rightarrow \infty$  a los límites  $\rho_1$  y  $\rho_n$ . Al hacer  $r = 0$  se tiene  $N_n(\omega, 0) = 1$ , y entonces:

$$\rho(0)_{a,s} = \rho_1 \int_0^{\infty} \omega J_1(\omega) d\omega = \rho_1 \quad (22)$$

cuando  $r \rightarrow \infty$  se tiene  $\lim_{r \rightarrow \infty} N_n(\omega, r) = \frac{\rho_n}{\rho_1}$ , de esta forma se tendrá:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \rho(r)_{a,s} = \rho_1 \int_0^{\infty} \frac{\rho_n}{\rho_1} \omega J_1(\omega) d\omega = \rho_n \quad (23)$$

- c) **Fallo de la ley de simetría de cortes recíprocos.** En las curvas de resistividad aparente no se cumple el principio de simetría con respecto al eje de las abscisas.
- d) **Asíntotas oblicuas.** En el caso límite  $\rho \rightarrow \infty$  la curva de resistividad aparente posee una asíntota rectilínea, de pendiente  $+1$ , que corta al eje  $\rho_a = 1$  en el punto de abscisa  $S$ , siendo esta magnitud la suma de las conductancias longitudinales de todas las capas excepto la última.

$$\lim_{\rho_n \rightarrow \infty} N_n(\omega, r) = \frac{r}{\omega S} \quad (24)$$

$$\rho(r)_{a,s} = \int_0^{\infty} \frac{r}{\omega S} \omega J_1(\omega) d\omega = \frac{r}{S} \quad (25)$$

Donde se ha puesto  $\rho_1=1$  de acuerdo con el criterio de normalización.

En coordenadas logarítmicas se tendrá:

$$\ln \rho(r)_{a,s} = \ln r - \ln S \quad (26)$$

No existe asíntota descendente para el caso  $\rho=0$ , como consecuencia del fallo de la ley de simetría.

#### 4.3.2 Cálculo numérico de la curva de resistividad aparente.

El problema directo de la Prospección Geoeléctrica sobre medios estratificados es el de la determinación del potencial producido en la superficie límite aire-tierra de un medio de este tipo por una fuente puntual de corriente situada en dicha superficie; en el caso de dispositivos tipo Schlumberger, se requiere el conocimiento del campo eléctrico en la superficie del terreno, por lo que se hace preciso el cálculo, por derivación, del gradiente del potencial hallado.

Para darle solución a la ecuación (18), se evalúa la integral por medio de la técnica del filtrado digital, cuyos principios fueron dados por Ghosh en 1971, (Ghosh, 1971), donde el concepto más importante radica en convertir la expresión que representa el potencial en una integral de convolución de tal forma que las expresiones sean relaciones lineales y por lo tanto la función de resistividades aparentes generada por cualquier arreglo electródico sea también una relación lineal.

Fue empleado como herramienta para resolver el problema directo el programa de cómputo RESIX Plus v.2, el cual contiene como subrutina el programa "ZHANKS" elaborado por Anderson, W.L, (Anderson, 1979).

El diseño de los coeficientes del filtro digital lineal de Anderson está basado en la demostración de cómo puede darse solución a la función Kernel mediante el empleo de la transformada de Hankel del mismo orden.

Se define la transformada de Hankel de la función Kernel  $k(\lambda)$  dentro de la integral de orden  $n$  (Anderson, 1979) como:

$$K(b) = \int_0^{\infty} k(\lambda) J_n(b\lambda) d\lambda, \quad b > 0 \quad (27)$$

Para el diseño del filtro se requiere realizar el siguiente cambio de variables:

$$x = \ln(b), \quad y = \ln\left(\frac{1}{\lambda}\right) \quad (28)$$

Las cuales son sustituidas dentro de la ecuación (27) y se multiplica en ambos lados por  $e^x$ , de tal forma que se obtenga simetría en ambas direcciones de la abscisa.

$$e^x K(e^x) = \int_0^{\infty} k(e^{-y}) [e^{x-y} J_n(e^{x-y}) dy] \quad (29)$$

La integral (29) tiene la forma de una integral lineal de convolución, donde  $k(e^{-y})$  es la función de entrada, y el término que se encuentra entre paréntesis es llamado función respuesta del filtro. Mediante el empleo del teorema de convolución, la respuesta del filtro puede determinarse por el uso de un par de funciones conocidas que actúen como entrada y salida respectivamente.

Anderson (1975) encontró experimentalmente que la precisión del filtro mejora utilizando filtros diseñados a partir de integrales de convolución conocidas que tengan unas funciones de entrada y salida de decrecimiento rápido. Por ello Anderson seleccionó las siguientes transformadas de Hankel (Anderson, 1975):

$$\int_0^{\infty} \lambda \exp(-a\lambda^2) J_0(b\lambda) d\lambda = [\exp(-b^2/4a)]/(2a) \quad (30)$$

$$\int_0^{\infty} \lambda^2 \exp(-a\lambda^2) J_1(b\lambda) d\lambda = b[\exp(-b^2/4a)]/(2a)^2 \quad (31)$$

Donde,

$$a > 0, \quad b > 0$$

La aplicación de los pesos del filtro para un Kernel de cualquier orden en la ecuación (27) está dada por la suma de convolución para todo  $b > 0$  ( $x = \ln b$ ):

$$K(b) = \left\{ \sum_{i=N_1}^{N_2} W_i k[\exp(A_i - x)] \right\} / b \quad (32)$$

Donde  $W_i$  son los pesos del filtro y  $(A_i - x)$  son los valores desfasados de la Abcisa para  $i = N_1, \dots, N_2$  y  $N_1 \geq 1, N_2 \leq 283$ . Los valores de  $N_1$  y  $N_2$  son determinados automáticamente por la subrutina "ZHANKS", basándose en el uso del kernel y en un factor de tolerancia.

#### 4.3.3 Proceso de Inversión.

La esencia del método de inversión utilizando "ridge regression" (Inman, 1975) puede describirse como sigue. Las variables que intervienen dentro del problema de interpretación de sondeos eléctricos verticales pueden dividirse en tres grupos:

- a) *Datos de observación*,  $g_1, g_2, \dots, g_n$ , que pueden considerarse como componentes de un vector  $\mathbf{G}$ . Estos datos son las resistividades aparentes observadas.
- b) *Parámetros conocidos*,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , que, del mismo modo constituyen un vector  $\mathbf{x}$ . Estos parámetros son las distancias  $AB/2$  utilizadas.
- c) *Los parámetros desconocidos* y que se trata de calcular,  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ , que forman un tercer vector  $\mathbf{P}$  que, en el SEV son los espesores y resistividades de las diversas capas.

Si se conoce una solución aproximada  $\mathbf{P}^0$ , se puede estimar su grado de validez mediante el cálculo del vector  $\mathbf{G}_A$  que le corresponde, mediante la resolución del problema directo; y la determinación de la diferencia  $\Delta\mathbf{G}$  entre el vector observado  $\mathbf{G}$  y  $\mathbf{G}_A$ . En general,  $\Delta\mathbf{G}$  no será nulo, ya que  $\mathbf{P}^0$  es sólo una solución aproximada.

Debido a que  $\mathbf{P}^0$  no es exacta, habrá de modificarse en un vector  $\Delta\mathbf{P}$  tal que haga nulo  $\Delta\mathbf{G}$ . Si el problema fuese lineal se tendría mediante la expansión de series de Taylor de primer orden:

$$\Delta\mathbf{G} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{P} + \varepsilon \quad (33)$$

$$\Delta G = G(P, x_i) - G(P^0, x_i); i = 1, N$$

Donde  $\varepsilon$  es un vector de errores que debe minimizarse, y  $\mathbf{A}$  es la matriz de derivadas

$$A_{ij} = \left. \frac{\partial G(P, x)}{\partial P_j} \right|_{P^0} \quad (34)$$

Cuyo orden es  $m \times n$ . Si  $\mathbf{P}^0$  es suficientemente aproximado, y  $m \leq n$ , el vector  $\Delta\mathbf{P}$  puede obtenerse mediante la técnica de mínimos-cuadrados (Inman et al, 1973):

$$\Delta P = (A^T A)^{-1} A^T \Delta G \quad (35)$$

Como en el caso del SEV la relación entre **G** y **P** no es lineal, la solución  $\Delta P$  de la fórmula anterior, no será exacta, por lo que el proceso habrá de repetirse varias veces, obteniéndose en cada iteración una  $\Delta P_i$ , hasta que la suma de todos ellos con **P**<sup>o</sup> constituya una solución aceptable, esto es, tal que  $\epsilon$  sea menor que un valor dado de antemano.

Sin embargo, Inman recupera los trabajos de Hoerl y Kennard, en donde demuestran que cuando la matriz  $(A^T A)$  tiene valores propios muy pequeños y por ende es casi singular, se tiene una varianza muy grande en la estimación por mínimos cuadrados. Ante tal problemática Inman emplea la "ridge regresión" (Inman, 1975), mediante la cual, la estimación del vector  $\Delta P$  quedaría expresada de la siguiente manera:

$$\Delta P = (A^T A + k I)^{-1} A^T \Delta G \quad (36)$$

Donde  $I$  es la matriz identidad y  $k \geq 0$ .

#### 4.3.4. Análisis de Equivalencia.

Se definen como "cortes equivalentes" a aquellos que, aunque difieran en los parámetros de sus capas e incluso en el número de éstas, tienen curvas de campo que difieren entre sí en menos del límite de error experimental.

La disparidad entre los cortes correspondientes a una misma curva de campo desaparece casi por completo si los cortes no se representan por sus Curvas de resistividad verdadera, sino por sus curvas de Dar Zarrouk.

Para la generación de dichas curvas es necesario definir la Resistencia transversal unitaria y la Conductancia longitudinal unitaria de un medio estratificado.

Si se tiene un prisma recto de sección cuadrada, con eje perpendicular a la orientación de las capas y de lado igual a la unidad de longitud, el cual es atravesado por una corriente eléctrica que fluye perpendicularmente a la estratificación, las diferentes capas se comportarán como conductores en serie, por lo que sus resistencias se sumarán:

$$T_i = E_i \rho_i \quad (37)$$

Este producto se llama Resistencia Transversal Unitaria ; la resistencia total de las capas se obtendrá mediante la siguiente sumatoria:

$$T = \sum_i E_i \rho_i \quad (38)$$

Si se supone ahora, que la corriente fluye paralelamente a la estratificación, la resistencia del prisma actuarán en paralelo, por lo que no pueden sumarse, por lo tanto se trabaja con las inversas de las conductancias:

$$S_i = \frac{E_i}{\rho_i} \quad (39)$$

A dicho cociente se le llama Conductancia Longitudinal Unitaria. La conductancia total se obtiene mediante la sumatoria de cada una de las conductancias:

$$S = \sum_i \frac{E_i}{\rho_i} \quad (40)$$

En general, la corriente en el subsuelo es oblicua, por lo que se deben tomar en cuenta ambas magnitudes.

Se puede generar un modelo de espesor igual a la suma de espesores de las capas del corte estratificado, de modo que los parámetros de T y S sean los mismos, si definimos el coeficiente de anisotropía y la resistividad media del conjunto, considerando las siguientes expresiones:

$$T = E \rho_T \quad (41)$$

$$S = \frac{E}{\rho_L}$$

Donde  $\rho_T$  y  $\rho_L$  son la resistividad transversal media y la resistividad longitudinal media respectivamente; entonces se tendrá:

$$A = \sqrt{\frac{\rho_T}{\rho_L}} \quad (42)$$

Que es el Coeficiente de anisotropía.

La resistividad media podrá obtenerse de la siguiente manera:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_L \rho_T} \quad (43)$$

Finalmente, podrá escribirse:

$$T = AE\rho_m \quad (44)$$
$$S = \frac{AE}{\rho_m}$$

Para generar las curvas de Dar Zarrouk deben calcularse T y S para profundidades intermedias, lo cual se conoce como pseudo-espesores; donde:

$$Az = (TS)^{1/2} \quad (45)$$
$$\rho_m = \left(\frac{T}{S}\right)^{1/2}$$

donde debe sustituirse E por z ya que aquí el espesor E es igual a la profundidad considerada.

A cada parte del terreno comprendida entre la superficie y cualquier profundidad z le corresponderá un pseudo-espesor  $Az(z)$  y una  $\rho_m(z)$ . Estas funciones se consideran como las ecuaciones paramétricas de la curva de Dar Zarrouk, por su dependencia respecto de las funciones T(z) y S(z).

La importancia de las curvas de Dar Zarrouk radica en que, dado un corte geoelectrico, todos los cortes equivalentes a él podrán hallarse mediante modificaciones en dicha curva; basándose en el "principio de equivalencia" y en el "principio de supresión".

El principio de equivalencia clásico se refiere a las modificaciones que pueden efectuarse en una sola capa del corte sin alterar la profundidad del techo de la capa y variando sólo en escasa medida la Curva de Dar Zarrouk del corte. Esto puede hacerse en dos casos, a los que se les conoce como "equivalencia en T" y "equivalencia en S".

a) Equivalencia en T.

Cuando la conductancia longitudinal  $S_i$  de una capa es mucho menor que la total  $S^{-1}$  de las capas suprayacentes, puede dividirse su espesor y multiplicarse su resistividad por un mismo número  $>1$ , sin que la curva de Dar Zarrowk se modifique apreciablemente.

b) Equivalencia en S.

Cuando la resistencia transversal  $T_i$  de una capa es mucho menor que la total  $T^{-1}$  del conjunto de capas suprayacentes, puede dividirse su espesor y resistividad por un mismo número  $>1$ , sin que la curva de Dar Zarrowk del corte se modifique de modo apreciable.

El principio de supresión plantea la sustitución de una capa del corte por varias o viceversa en condiciones de equivalencia, siempre y cuando los arcos de Dar Zarrowk de las nuevas capas crucen el arco inicial.

#### **4.4 Aplicación directa de los Parámetros de Dar Zarrowk en problemas de Hidrogeología.**

El método de sondeos eléctricos verticales es el más usado para la exploración de agua subterránea, por tal motivo, diversos autores han tratado de establecer alguna relación empírica o semi-empírica entre algunos parámetros del acuífero, con aquellos parámetros obtenidos mediante mediciones de resistividad.

Sri Niwas junto con D.C. Singhal, ( Sri Niwas and D.C. Singhal, 1981); establecen una relación analítica entre la transmisividad del acuífero y la resistencia transversal, basándose en el simple hecho de que la conductividad hidráulica y la resistividad presentan una relación lineal.

Considerando un prisma de área atravesada unitaria y altura  $h$ , del material del acuífero, entonces se tendrá (Sri Niwas and D.C. Singhal, 1981):

$$T = K\sigma R \quad (46)$$

donde T es la transmisividad que se obtiene al multiplicar el espesor del acuífero por la conductividad hidráulica del mismo; cabe destacar que se utiliza una nueva nomenclatura para la resistencia transversal, nombrándola R para evitar confusiones.

La ecuación (46) ofrece la posibilidad de estimar transmisividades y conductividades hidráulicas mediante la resistencia transversal, una vez que se conoce la naturaleza de la variación del producto. De igual manera, si el producto

permanece constante dentro de un área, se pueden calcular los valores de conductividad hidráulica para aquellos puntos en donde no se tenga su valor, basándose en unos cuantos puntos de control.

#### 4.5. Aplicación de la teoría.

El método eléctrico analizado en el presente trabajo consistió en la reinterpretación de Sondeos Eléctricos Verticales, los cuales presentaron un arreglo tipo Schlumberger, el cual emplea cuatro electrodos colocados de forma simétrica a partir de un centro.

Consiste de dos electrodos por los que la corriente es transmitida al subsuelo en forma tridimensional y generando con ello un campo eléctrico, dichos electrodos reciben, por convención, los nombres A y B, forman el circuito de emisión de corriente. Los otros dos electrodos M y N, los cuales se colocan en la parte interna del arreglo, son conocidos como electrodos de potencial, constituyen el sistema de recepción, ya que a través de ellos se mide la diferencia de potencial. (Fig.4.2). La teoría establece que la distancia entre los electrodos de corriente AB debe ser cinco veces mayor que la distancia entre los de potencial MN.

Se ha encontrado (A.ROY et al, 1971), que el valor de profundidad absoluta para el dispositivo Schlumberger es de  $0.125 L$ , donde  $L$  es la distancia entre los electrodos extremos activos, es decir, la distancia AB.

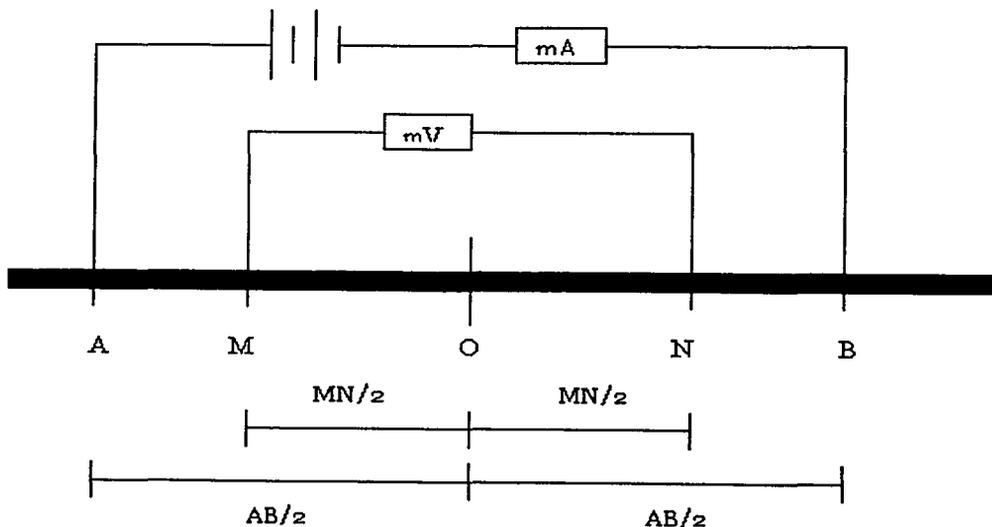


Fig.4.2 Esquema del arreglo Schlumberger.

#### 4.6. Interpretación a la Geofísica.

La interpretación que se realizó es del tipo cuantitativa, considerando una interpretación cualitativa previa mediante el análisis de las curvas de resistividad aparente y las pseudosecciones de isoresistividad aparente, posteriormente se procedió a la interpretación de la curva de resistividad obtenida en campo, y finalmente se elaboraron los perfiles geoeléctricos correspondientes.

Fueron seleccionados dentro del área de estudio 52 sondeos eléctricos verticales; los datos de campo,  $\rho_a$  y  $AB/2$ , se cargaron en archivos de datos independientes con la finalidad de ingresarlos al programa RESIXP. La interpretación se realiza mediante el planteamiento de un modelo inicial basado en las propiedades asintóticas de la curva de resistividad aparente y en la información procedente de cortes geológicos cercanos al sondeo; el programa de cómputo resuelve el problema directo y permite comparar la curva de resistividades aparentes que se obtendrían con el corte propuesto y la curva de campo; mediante el procedimiento de inversión se puede optimizar el modelo inicial, hasta lograr un corte que se aproxime de forma satisfactoria al concepto geológico de la zona estudiada.

El análisis de equivalencia para cada corte es sumamente necesario, ya que basándose en la teoría del principio de equivalencia, se puede encontrar un modelo más certero a partir de las modificaciones realizadas sobre la curva de Dar Zarrouk.

Se elaboró como una herramienta, un programa de cómputo en lenguaje "C" que calcula los parámetros de Dar Zarrouk, S y T, para cada capa, así como la curva del mismo nombre. El objetivo de dicho cálculo fue el generar patrones extras que ayudaran en la identificación de unidades geoeléctricas.

Tomando como ejemplo uno de los sondeos utilizados para la interpretación de la sección F-F' se calculó la curva de Dar Zarrouk correspondiente al modelo seleccionado, de igual forma se hizo con dos modelos equivalentes. Los modelos se obtuvieron mediante el uso del programa RESIXP, el cual permite realizar un análisis de equivalencia.

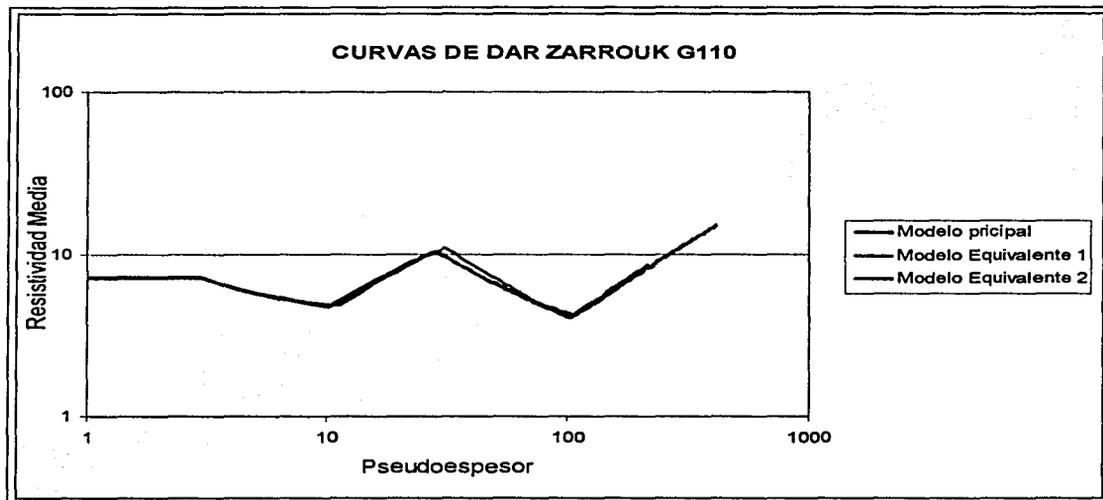
DATA SET: GUYSA110		
FITTING ERROR: 2.417 PERCENT		
6		
L #	RESISTIVITY	THICKNESS
	(ohm-m)	(meters)
1	7.15	2.97
2	4.02	6.86
3	20.62	11.11
4	2.56	58.12
5	55.65	103.0
6	21.38	

**MODELO GEOELÉCTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO**  
**TESIS PROFESIONAL**

DATA SET: GUYSA110		
MODELO EQUIVALENTE2		
FITTING ERROR: 2.868 PERCENT		
6		
L #	RESISTIVITY (ohm-m)	THICKNESS (meters)
1	7.14	3.00
2	3.97	6.72
3	20.96	11.11
4	2.36	51.46
5	83.11	16.22
6	26.33	

DATA SET: GUYSA110		
MODELO EQUIVALENTE1		
FITTING ERROR: 2.910 PERCENT		
6		
L #	RESISTIVITY (ohm-m)	THICKNESS (meters)
1	7.12	2.94
2	4.16	7.74
3	23.84	11.11
4	1.76	39.05
5	52.51	98.39
6	21.21	

Como puede observarse, los modelos difieren en algunos espesores, sin embargo, al calcular la Curva de Dar Zarrowk correspondiente a cada modelo obtenemos, al graficarlas en escala logarítmica el siguiente resultado:



En la gráfica puede observarse que las curvas difieren muy poco entre sí, con lo cual se demuestra la conveniencia de representar a los cortes geoelectricos mediante la Curva de Dar Zarrowk y no por la curva de Resistividades Verdaderas.

Una vez que se elaboraron las secciones geológicas previas, se procedió a la interpretación y calibración de los sondeos, lo cual permitió dar seguimiento lateral

a las unidades propuestas mediante el análisis de los cortes geológicos y geoelectricos.

Para la delimitación de las unidades propuestas se analizaron, primero que nada, las seudosecciones de isorresistividad aparente, posteriormente, mediante el proceso de interpretación se observaron los contrastes de resistividad en los modelos propuestos para cada sondeo.

Se elaboraron 8 perfiles geoelectricos, los cuales se detallan a continuación.

Cabe destacar que las seudosecciones geoelectricas que se presentan fueron elaboradas con el único propósito de ejemplificar gráficamente la relación espacial entre las unidades eléctricas propuestas; la geometría de las unidades no considera la información litológica, por lo que los espesores representados entre sondeos no son "reales".

La evaluación de los espesores se realizó sobre las secciones geológicas-geofísicas las cuales se presentan dentro del capítulo de análisis de resultados.

Se identificaron 7 unidades geoelectricas, a las cuales se les da un seguimiento a través de los perfiles propuestos.

#### **Perfil A-A'.**

Dentro de este perfil fueron reinterpretados ocho sondeos SEV, TLA 3, TLA 2, TLA1, SOL 1, SOL 2, G-202, CEL 1 y G-201 (**Anexo 2**).

La seudosección de isorresistividades aparentes presenta un comportamiento uniforme, con resistividades aparentes bajas, menores de 19 Ohm-m. , sin embargo, se observan con claridad resistividades bajas en la superficie, con una tendencia a aumentar sus valores mientras crece la abertura AB/2, sobre todo, bajo los sondeos TLA1, SOL1, SOL2 y G202( **figura 4.3**).

Su orientación preferencial es E - W. Tiene una longitud de 8 km.

Al analizar el presente perfil se detectan 6 unidades geoelectricas, alternándose unidades de baja resistividad y unidades de alta resistividad.

La seudosección geoelectrica obtenida se presenta en la **figura 4.4**.

Los pozos de calibración fueron el 2427, 2083, 967 y 1010 (ver anexo de información litológica).

Las unidades geoelectricas identificadas en este perfil se describen a continuación ordenadas de la más superficial a la más profunda:

UNIDAD	ESPESOR m	RESISTIVIDAD OHM/M	DESCRIPCIÓN
0	10 - 31	4 - 9	Unidad de resistividad baja que se presenta en la superficie
1	31	17 - 39	Unidad de media a alta resistividad presente bajo los sondeos SOL2 G-202 y CEL 1, aflora en superficie.
2	20 - 135	1 - 12	Unidad de resistividad baja que se presenta de forma continua con variación de espesor.
3	5 - 38	25 - 123	Unidad de resistividad alta, se acuña bajo el sondeo TLA1
4	11 - 82	1 - 19	Unidad de resistividad baja, presente bajo todos los sondeos. Continua en este perfil con espesor variable.
5	Última capa	30 - 123	Unidad de resistividad alta, última capa registrada.

### Perfil B-B'.

En este perfil fueron interpretados siete sondeos eléctricos verticales, TLA 6, TLA5, ALAS110, TEC 3, TEC, 4, TEC 2 y TEC 1. Los pozos de calibración fueron el 601, 600 y 955.

La seudosección de isorresistividades aparentes, (**figura 4-5**), se dividió en dos partes, partiendo de la considerable distancia que existe entre los sondeos; el comportamiento de la primera parte, refleja en superficie resistividades relativamente bajas, es decir, menores a 15 Ohm-m. ; sin embargo, para aberturas AB/2 mayores a 500 m, se observa un aumento de las resistividades bajo los sondeos TLA6, TLA5 y ALAS110.

Para la segunda parte, conformada por los sondeos restantes, se observa una zona de alta resistividad bajo los sondeos TEC1, TEC2 y TEC4, resistividad contrastante con el comportamiento del resto del perfil, para aberturas que van desde los 100 m hasta 800 m; el comportamiento en el resto del perfil es uniforme y de baja resistividad.

La seudosección geoelectrica se dividió, de igual manera, en dos partes, debido a que los sondeos se encuentran separados por una distancia muy grande, por lo que no se puede realizar una correlación entre ellos sin considerar información litológica de pozos.

La orientación preferencial es W – E, paralela a los perfiles A – A' y B – B'. En total, la longitud de los dos perfiles es de 7 km.

En el perfil mostrado en la **figura 4.6**, la unidad 4 se presenta como la última capa registrada por los sondeos.

Las unidades geoelectricas identificadas en este perfil se describen a continuación ordenadas de la más superficial a la más profunda:

UNIDAD	ESPESOR m	RESISTIVIDAD OHM/M	DESCRIPCIÓN
0	4 - 15	4 - 15	Unidad de resistividad baja a media que se presenta en la superficie
1	28 - 71	27 - 39	Unidad de resistividad alta presente en los sondeos TLA5 y TLA6
2	15 - 143	2 - 19	Unidad de resistividad baja a media. Presente bajo todos los sondeos con continuidad, variando su espesor. Última capa para sondeo ALAS110
3	14 - 57	22 - 153	Unidad de resistividad alta presente en los sondeos restantes.
4	Última capa	3 - 19	Unidad de resistividad baja, última capa registrada.

#### Perfil C-C'.

Para esta sección fueron reinterpretados 8 SEV, los cuales fueron: RV 3, RV 2 RV 1, G-108, G-107, G-106, MEN y CAÑADA. Los pozos de calibración fueron el 651, 652, 914-A, 2080 y 2076 (**Anexo 1**).

El comportamiento de la pseudosección de isorresistividades aparentes, es similar al registrado para la pseudosección B-B'; presentándose desde la superficie hasta aberturas menores de 500 m resistividades bajas, menores a 19 Ohm-m.; por debajo de dicha abertura las resistividades se incrementan.

Bajo el sondeo G107, cuya abertura AB/2 final es de 1500m. se presenta una zona de baja resistividad, a partir de una AB/2 mayor a 1200 m.

Para el sondeo MENCHACA, la zona de alta resistividad se encuentra cercana a la superficie, y ésta se extiende bajo el sondeo.

El perfil fue dividido en dos partes, debido a la distancia que separa a los sondeos, la cual impide una correlación certera entre los mismos.

**MODELO GEOELÉCTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO  
TESIS PROFESIONAL**

La longitud total del perfil, considerando ambas partes, es de 9 km aproximadamente, tiene una dirección preferencial E - W, por lo que es paralela a los perfiles anteriores (**figura 4.7**).

En este perfil se detectan todas las unidades geoelectricas diferenciadas para la zona de estudio, a continuación se describen dichas unidades, ordenadas de la más superficial a la más profunda.

UNIDAD	ESPESOR m	RESISTIVIDA D OHM/M	DESCRIPCIÓN
0	31	18	Unidad de baja resistividad. Se presenta en superficie en el sondeo Menchaca.
1	13	80 - 128	Unidad de resistividad alta. Aflora en superficie. Presente en el sondeo Menchaca.
2	32 - 166	1 - 17	Unidad de baja resistividad que se presenta en forma continua en el perfil. Presenta una zona de alta resistividad catalogada como perteneciente a la unidad 3
3	61 - 75	41 - 360	Unidad de alta resistividad. Se aprecia su espesor en 4 sondeos únicamente. Ultima capa para los restantes.
4	> 57	1 - 15	Unidad de baja resistividad registrada en 4 sondeos
5	> 126	197 - 198	Unidad de alta resistividad. Registrada bajo los sondeos G107 y G108
6	Ultima capa	6 - 10	Unidad de baja resistividad registrada por los sondeos de mayor profundidad de penetración.

**Perfil D-D'.**

En esta sección fueron analizados 13 SEV: BALV 6, BALV 5, BALV 4, PUEB 3, RV2, G-106, G-105, G-104, G-103, G-102, CAÑADA, CAMP 3 y CAMP 2. Puede notarse que algunos de los sondeos fueron utilizados en la interpretación de las unidades geoelectricas de las secciones anteriores, en muchas ocasiones los sondeos no se encuentran exactamente sobre la línea en la que se traza la proyección del perfil deseado, es por ello que pueden pertenecer a varias secciones.

La seudosección de isorresistividades aparentes presenta valores altos de resistividad, mayores a 30 Ohm-m, bajo los sondeos G-104, G-103, G-102, CAÑADA, CAMP 3 y CAMP 2, teniendo su máximo en el sondeo CAMP2. Es

identificable, por lo tanto, una estructura anómala entre los 10 y 14 km (**figura 4.9**).

En los sondeos restantes, el comportamiento es homogéneo, con resistividades relativamente bajas, menores de 20 Ohm-m para aberturas por debajo de 500 m; por arriba de éste valor las resistividades aumentan.

Bajo los sondeos BALV4 y PUEB3 se presenta una zona de alta resistividad cercana a la superficie.

Los pozos de calibración para la interpretación de los SEV fueron el 629, 654, 630, 638, 727, 730, 725-A y 1811.

El perfil tiene una longitud de 16 km, con una orientación preferencial E – W (**figura 4.10**); se detectan nuevamente las 7 unidades geoelectricas identificadas en la zona de estudio.

A continuación se describen dichas unidades, ordenadas de la más superficial a la más profunda:

UNIDAD	ESPEJOR m	RESISTIVIDAD OHM/M	DESCRIPCIÓN
0	4 - 31	3 - 22	Unidad de resistividad baja a media. Se presenta en superficie y encajonada en la unidad 1.
1	3 - 139	29 - 800	Unidad de resistividad alta. Aflora en superficie, sobre todo en los altos topográficos.
2	53 - 126	1 - 16	Unidad de baja resistividad, continua a lo largo del perfil. Última capa para 4 sondeos.
3	25 - 85	31 - 560	Unidad de alta resistividad. Identificada bajo 8 sondeos de forma continua.
4	13 - 58	1 - 13	Unidad de baja resistividad. Se presenta en forma continua. Encajonada en la unidad 3.
5	> 127	132 - 210	Unidad de resistividad alta, registrada por 3 sondeos.
6	Última capa	10	Unidad de baja resistividad. Última capa registrada por el sondeo G106.

#### Perfil E-E'.

Fueron interpretados 11 SEV dentro de este perfil: PUEB 2, PUEB 1, UDEP 1, UDEP 2, UDEP 3, G104, G103, G102, G101, CCH1 y CCH 2.

El perfil tiene una longitud de 12 km. Su orientación preferencial es W-E (**figura 4.11**).

Los pozos de calibración fueron el 649, 18822, 1930, 1823, 1998, 985, 556 y 2087 (**Anexo 1**).

La pseudosección de isorresistividades aparentes presenta un comportamiento similar al descrito anteriormente para el perfil E - E', ya que predominan las zonas de alta resistividad relativa, mayores de 30 Ohm-m; presentándose el máximo bajo el sondeo G104 en un área cercana a la superficie. Bajo éste máximo, se aprecian líneas de isorresistividad baja para aberturas que van desde los 700 m hasta 1300 m aproximadamente. Igual comportamiento presenta el sondeo G102 (**figura 4.12**).

Nuevamente, es posible apreciar un comportamiento anómalo, bajo los sondeos G104, G103, G102.

Bajo los sondeos PUEB2 y PUEB1, se observan resistividades bajas para aberturas AB/2 menores a 500 m; para valores mayores, las resistividades observadas se incrementan

Las unidades geoelectricas identificadas en este perfil se describen a continuación ordenadas de la más superficial a la más profunda:

UNIDAD	ESPESOR m	RESISTIVIDAD OHM/M	DESCRIPCIÓN
0	1 - 53	1 - 19	Unidad de resistividad baja a media que se presenta en la superficie y en los altos topográficos. En una zona se presenta encajonada por la unidad 1.
1	17 - > 194	23 - 800	Unidad de alta resistividad, continua, hacia el Este aumenta su espesor.
2	31 - 110	2 - 14	Unidad de resistividad baja a media. Se encuentra de forma continua en el perfil hasta la falla.
3	> 74	43 - 500	Unidad de alta resistividad. Última capa para los sondeos UDEP1, UDEP2 y UDEP3.
4	> 24	1	Unidad de baja resistividad. Última capa para casi todos los sondeos
5	Última capa	133	Unidad de alta resistividad registrada por el sondeo PUEB2 únicamente.

**Perfil F-F'.**

El presente perfil corta en forma perpendicular a todos los perfiles antes descritos, su orientación preferencial es S - N; tiene una longitud de 10 km.

La orientación se determinó de tal manera que el perfil contuviera el mayor número de sondeos posibles, así que exceptuando los sondeos G109 y G110, los restantes pertenecen a los perfiles anteriores, en total el perfil se basa en trece sondeos.

La seudosección de isorresistividades aparentes presenta un comportamiento uniforme, con valores menores de 30 Ohm-m a lo largo del perfil; las resistividades aumentan sólo bajo el sondeo SPM2, ubicado al norte del perfil, teniendo su máximo en la superficie, donde alcanza valores mayores a 50 Ohm-m (**figura 4.13**).

El objetivo de la realización de este perfil, junto con el Perfil G - G' y H - H', fue el darle seguimiento espacial, y obtener con ello el concepto tridimensional del modelo geoelectrico.

La seudosección obtenida se muestra en la **figura 4.14**.

Las unidades geoelectricas identificadas en este perfil se describen a continuación ordenadas de la más superficial a la más profunda:

UNIDAD	ESPESOR m	RESISTIVIDAD OHM/M	DESCRIPCIÓN
1	2 - 33	23 - 129	Unidad de alta resistividad. Aflora casi de forma continua.
2	40 - 166	1 - 18	Unidad de baja resistividad. Se presenta en forma continua bajo todos los sondeos.
3	5 - 72	27 - 189	Unidad de alta resistividad. Continua, con variación de espesor.
4	> 14	1 - 19	Unidad de baja resistividad, no se puede interpretar su continuidad
5	Última capa	59 - 300	Unidad de alta resistividad registrada por 5 sondeos como última capa.

**Perfil G-G'.**

El presente perfil está dividido en dos partes debido a la distancia entre sondeos. Tiene una longitud total de 10 km, su orientación preferencial es S - N (**figura 4.15**).

Al igual que el perfil anterior, corta los perfiles A, B, C, D y E.

El perfil se basa en diez sondeos, en la primera parte del perfil se aprecia que los sondeos utilizados forman parte de los perfiles A, B, C, D y E. En la segunda parte, se basa en cinco sondeos no utilizados previamente: FJUR<sub>1</sub>, FJUR<sub>2</sub>, FJUR<sub>3</sub>, JURW<sub>2</sub> y JURW<sub>3</sub>.

La seudosección de isorresistividades aparentes registra valores relativamente altos de resistividad, mayores a 30 Ohm-m, a lo largo del primer perfil; sin embargo, la distancia existente entre los sondeos G104, MENCHACA y CEL<sub>1</sub> es mayor a 2 km, por lo tanto, la correlación e interpolación elaborada no es muy confiable (**figura 4.16**).

Sin embargo, es posible apreciar, un cambio abrupto en el comportamiento del perfil, bajo los sondeos G103 y G104; utilizados en las dos seudosecciones anteriores.

Para la segunda parte del perfil, se tiene una gran densidad de sondeos, por lo que la interpolación resulta más confiable; se observa una zona de altas resistividades cercanas a la superficie, debajo de éstas líneas se presenta una zona de bajas resistividades para los sondeos FJUR<sub>2</sub> y FJUR<sub>1</sub>

La importancia de este perfil radica en su extensión hacia la parte norte de la zona de estudio, en donde podemos apreciar que la unidad 6, de baja resistividad, última registrada en algunos de los perfiles anteriores, se encuentra a menor profundidad debido a la falla Menchaca, la cual no aflora en superficie, pero puede ser inferida fácilmente mediante la interpretación de éste perfil.

Las unidades geoelectricas identificadas en este perfil se describen a continuación ordenadas de la más superficial a la más profunda:

UNIDAD	ESPESOR m	RESISTIVIDAD OHM/M	DESCRIPCIÓN
0	10 - 32	4 - 19	Unidad de resistividad baja a media. Se presenta en superficie.
1	14 - 194	32 - 379	Unidad de resistividad alta. Aflora en superficie. Continua.
2	20 - 110	1 - 17	Unidad de baja resistividad, continua a lo largo del perfil con variación de espesor.
3	25 - 75	41 - 286	Unidad de alta resistividad. Continua a lo largo del perfil.
4	35 - 105	1 - 15	Unidad de baja resistividad. Se presenta en forma continua en el primer perfil.
5	> 20	43 - 484	Unidad de alta resistividad registrada como ultima capa para el perfil 1.
6	Ultima capa	1 - 7	Unidad de baja resistividad. Última capa registrada por los sondeos del perfil 2

### Perfil H - H'.

Con el fin de establecer el comportamiento espacial de las unidades se planteó un tercer perfil con dirección preferencial S - N y con una longitud de 8 km, considerando el mayor número de sondeos posibles (**figura 4.17**).

Corta a los perfiles B, C, D, E y G.

Para este perfil se utilizó únicamente un sondeo nuevo, CAN3, y otros seis utilizados previamente.

El comportamiento de las unidades es similar al descrito en el perfil anterior.

La pseudosección de isorresistividades aparentes presenta en superficie valores relativamente bajos, menores de 20 Ohm-m. Éste comportamiento es homogéneo para los sondeos MENCHACA y TEC3. Los sondeos restantes presentan bajo las líneas de baja resistividad, valores relativamente altos entre 20 y 40 Ohm-m, teniendo su máximo bajo el sondeo CAN3, en el cual, únicamente se presentan altas resistividades, registrando un comportamiento anómalo respecto al registrado en el resto del perfil (**figura 4.18**).

Las unidades geoelectricas identificadas en este perfil se describen a continuación ordenadas de la más superficial a la más profunda:

UNIDAD	ESPESOR m	RESISTIVIDAD OHM/M	DESCRIPCIÓN
0	4 - 32	1 - 19	Unidad de resistividad baja a media que se presenta en la superficie.
1	4 - 40	54 - 164	Unidad de alta resistividad, continua, Aflora en superficie.
2	22 - 78	2 - 18	Unidad de resistividad baja a media. Se encuentra de forma continua en el perfil con variación de espesor.
3	33 - 63	43 - 500	Unidad de alta resistividad. Continua bajo todos los sondeos, menos TEC3.
4	> 22	1 - 15	Unidad de baja resistividad. Apreciable en dos sondeos.
5	Ultima capa	200	Unidad de alta resistividad presenta únicamente bajo e sondeo G105 como última capa.

### 4.7 Modelo geoelectrico.

Se puede establecer, mediante la integración de los ocho perfiles geoelectricos elaborados, un modelo geoelectrico general para la zona de estudio.

Fueron detectadas 7 unidades geoelectricas, cuyo rasgo principal es la continuidad lateral, así como las variaciones de sus espesores; presentándose alternadamente capas de resistividad baja, y capas de alta resistividad.

Así, las capas 0, 2, 4 y 6 presentan resistividades que van de 1 a 19 Ohm -m; mientras que las capas 1, 3 y 5 tienen valores altos entre 20 y 300 Ohm-m.

La unidad 0 (cero) es la más superficial, su resistividad es de baja a media y su espesor varía desde unos cuantos metros hasta más de 30 m.

La unidad 1 presenta resistividades altas, en algunas zonas aflora en superficie, sobre todo en los altos topográficos relacionados a la acción del sistema de fallas NW-SE; hacia el sureste de la zona se aprecia un aumento considerable en su espesor, debido a la proximidad del volcán Cimatario.

La unidad 2 se presenta de forma continua bajo todos los sondeos analizados, es de baja resistividad.

La unidad 3 se presenta, de igual manera, bajo todos los perfiles en forma continua.

La unidad 6, de baja resistividad, es la más profunda, detectada únicamente por los sondeos con mayor profundidad de penetración.

En la tabla que se muestra a continuación se resumen los resultados obtenidos.

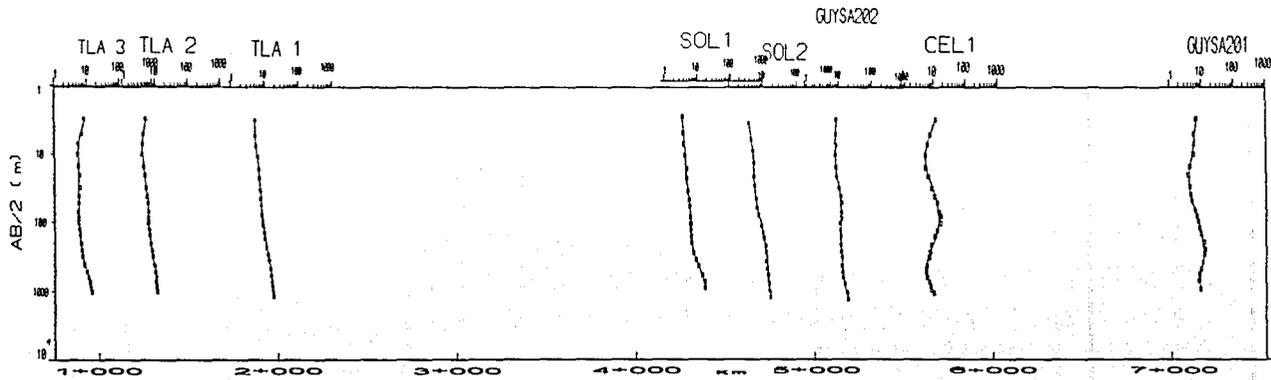
UNIDAD	ESPESOR m	RESISTIVIDAD OHM/M	DESCRIPCIÓN
0	4 - 53	4 - 19	Unidad de resistividad baja a media. Se presenta en superficie.
1	3 - 194	23 - 379	Unidad de resistividad alta. Aflora en superficie en algunas zonas.
2	20 - 110	1 - 19	Unidad de baja resistividad, continua a lo largo de los perfiles con variación de espesor.
3	5 - 85	21 - 560	Unidad de alta resistividad. Continua bajo todos los sondeos.
4	14 - 105	1 - 19	Unidad de baja resistividad. Se presenta en forma continua generalmente.
5	22 - 127	43 - 484	Unidad de alta resistividad. Apreciable bajo los sondeos cuya abertura AB/2 iguala o supera los 1000 m.
6	Ultima capa	1 - 10	Unidad de baja resistividad. Última capa registrada por los sondeos con mayor profundidad de penetración.

Es importante mencionar que no todos los sondeos eléctricos verticales proporcionaron la información deseada, debido principalmente, a aberturas AB/2 insuficientes si se considera las características del terreno que conforma el área de estudio, en donde se tienen capas muy conductoras en donde la corriente puede

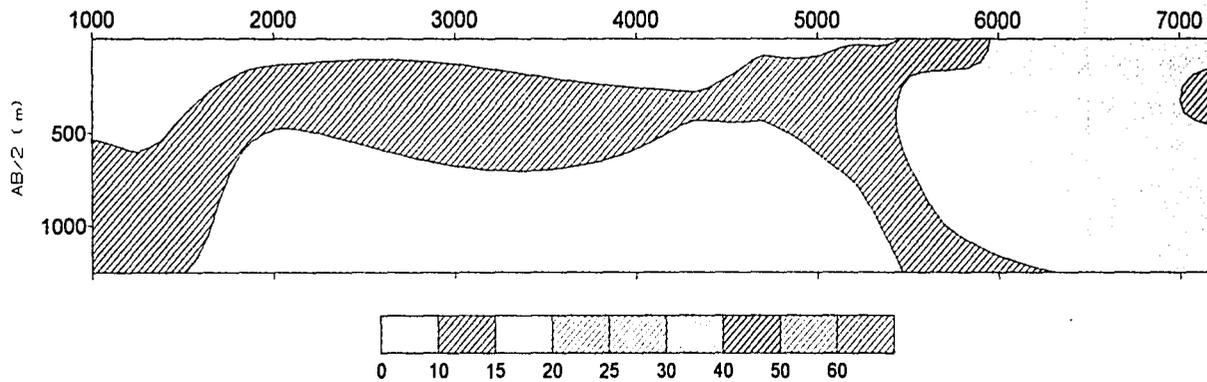
perderse, o bien debido a las pantallas resistivas que se generan ante la presencia de unidades con altas resistividades.

De igual manera, las resistividades se ven afectadas ante las altas temperaturas del agua subterránea, en donde se tienen registrados valores de hasta 60° C, (Ing. Héctor Macías en comunicación verbal).

CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE



SEUDOSECCIÓN DE ISORRESISTIVIDADES APARENTES

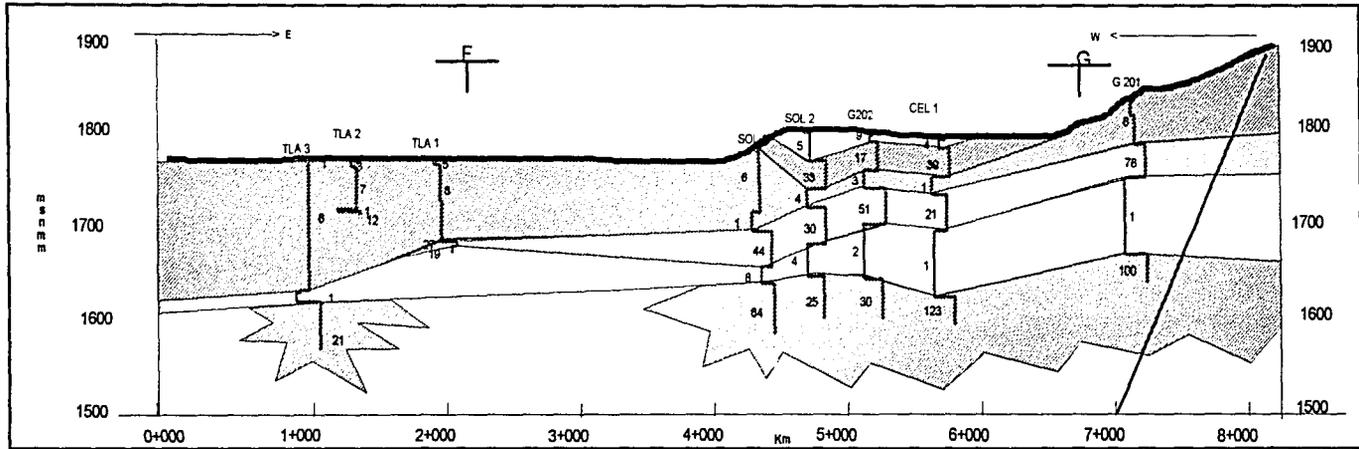


A - A'

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Figura 4.3 Seudosección de isorresistividades aparentes

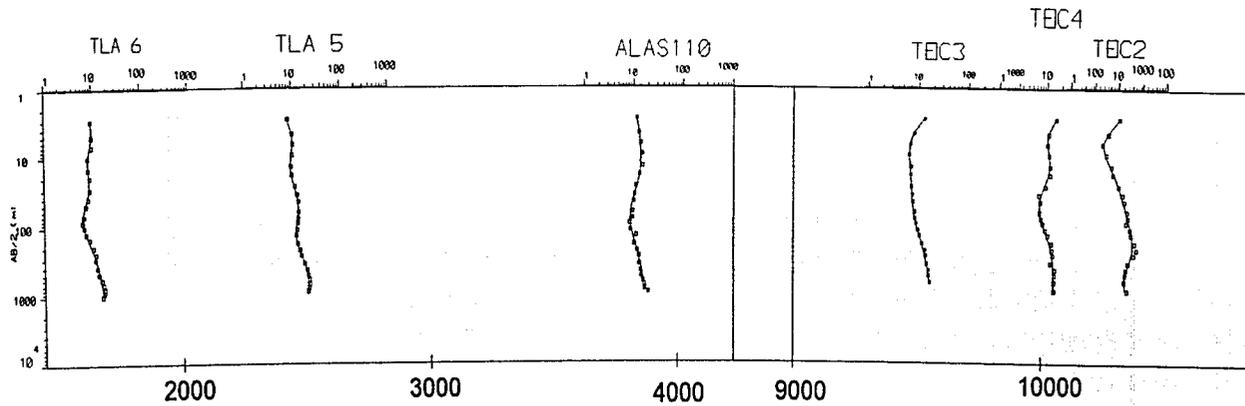
SEUDOSECCIÓN GEOELÉCTRICA A - A'



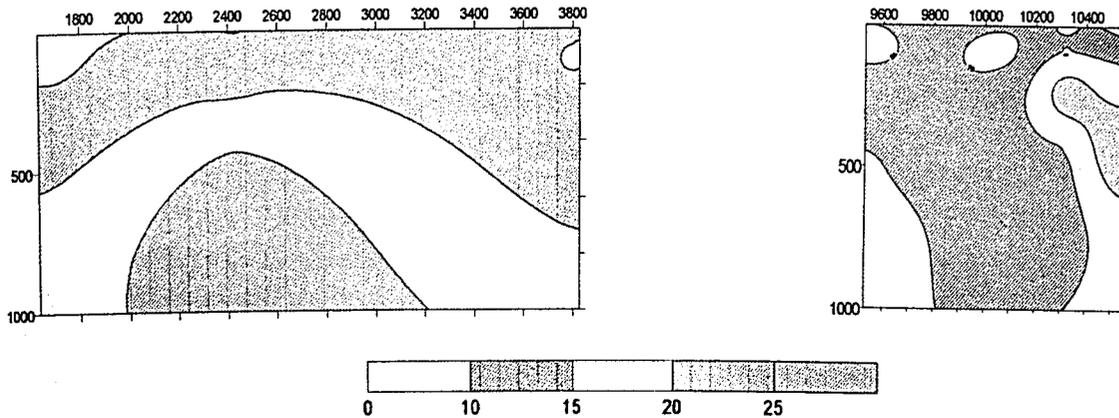
UNIDAD	RESISTIVIDAD (OHM-M)
0	4 - 9
1	17 - 39
2	1 - 12
3	25 - 78
4	1 - 19
5	30 - 123

Fig. 4.4

CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE



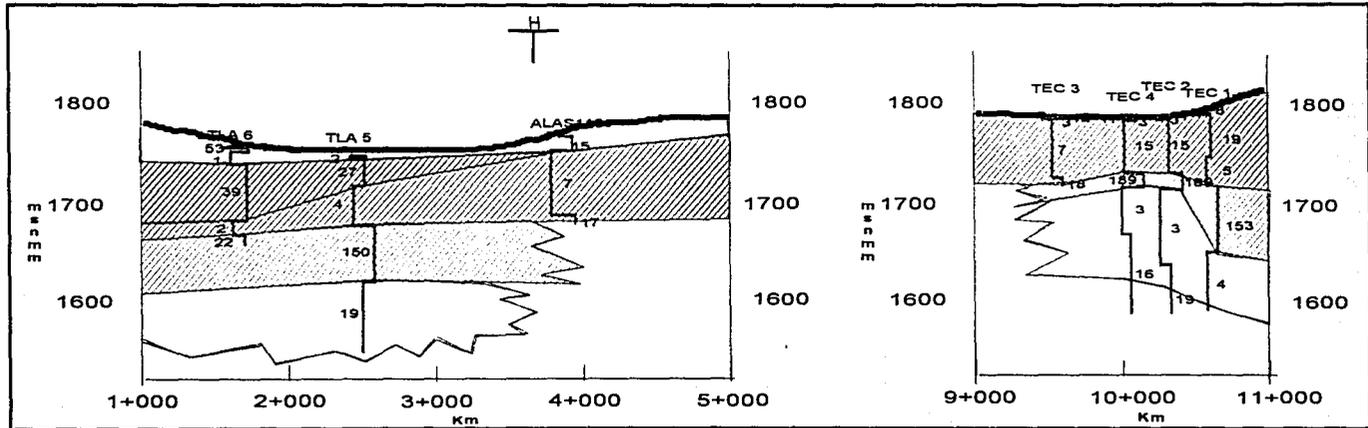
SEUDOSECCIÓN DE ISORRESISTIVIDADES APARENTES



B - B'

Figura 4.5 Seudosección de isorresistividades aparentes

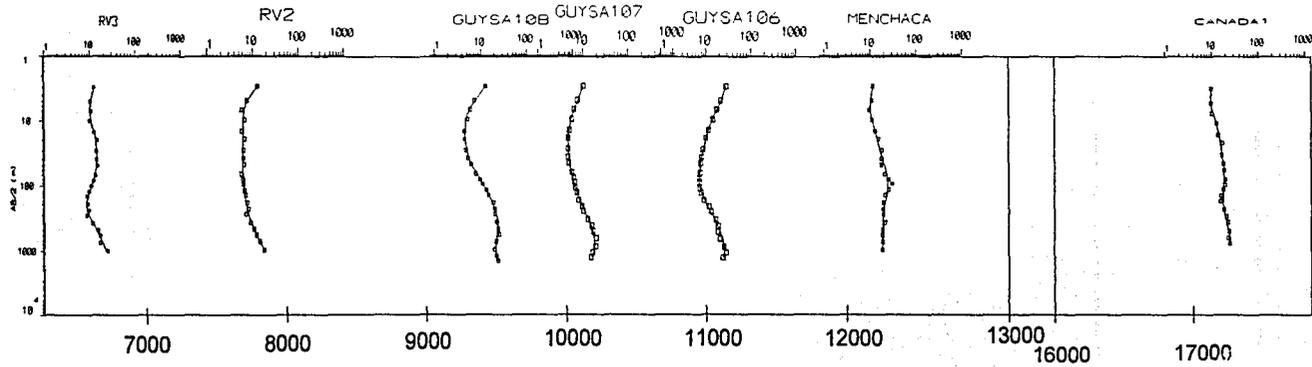
SEUDOSECCIÓN GEOELÉCTRICA B - B'



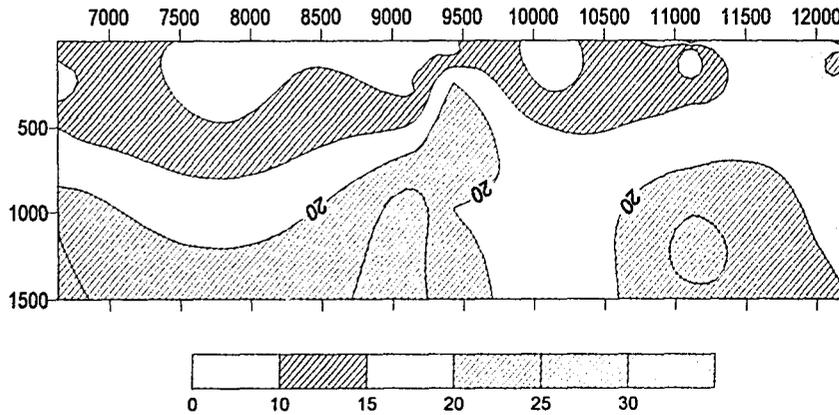
UNIDAD	RESISTIVIDAD (OHM-M)
0	4 - 15
1	27 - 39
2	2 - 19
3	22 - 153
4	3 - 19

Fig. 4.6

CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE



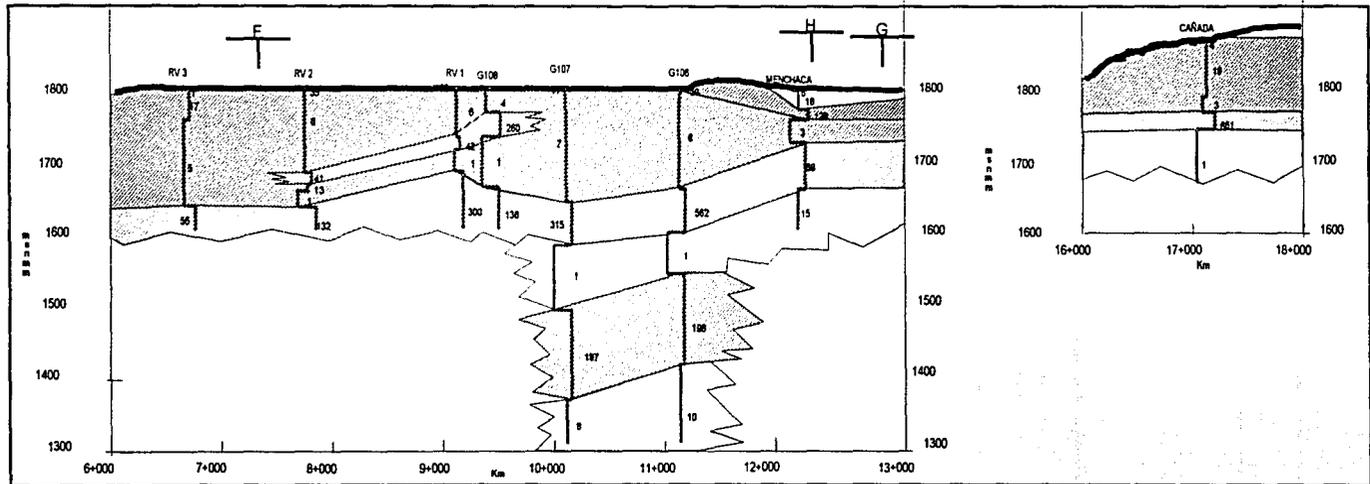
SEUDOSECCIÓN DE ISORRESISTIVIDADES APARENTES



C - C'

Figura 4.7 Seudosección de isorresistividades aparentes

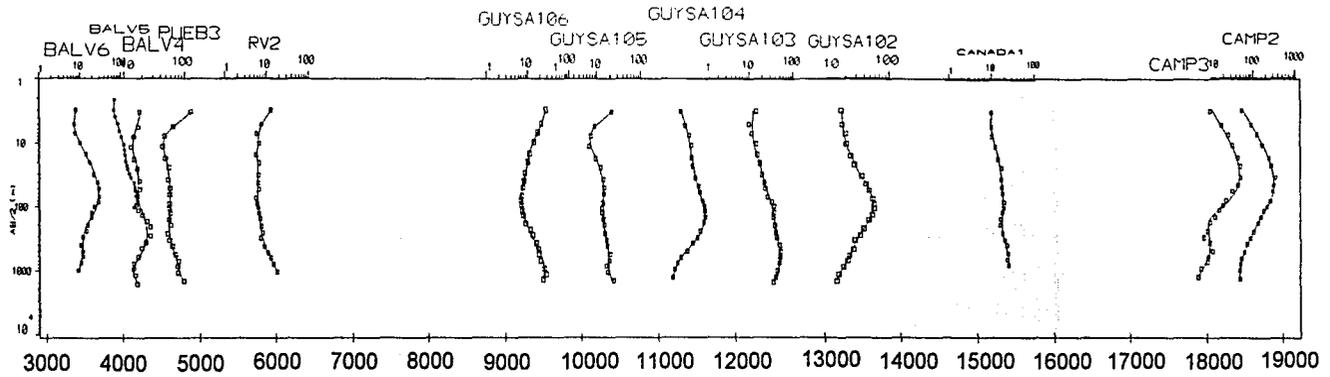
SEUDOSECCIÓN GEOELÉCTRICA C - C'



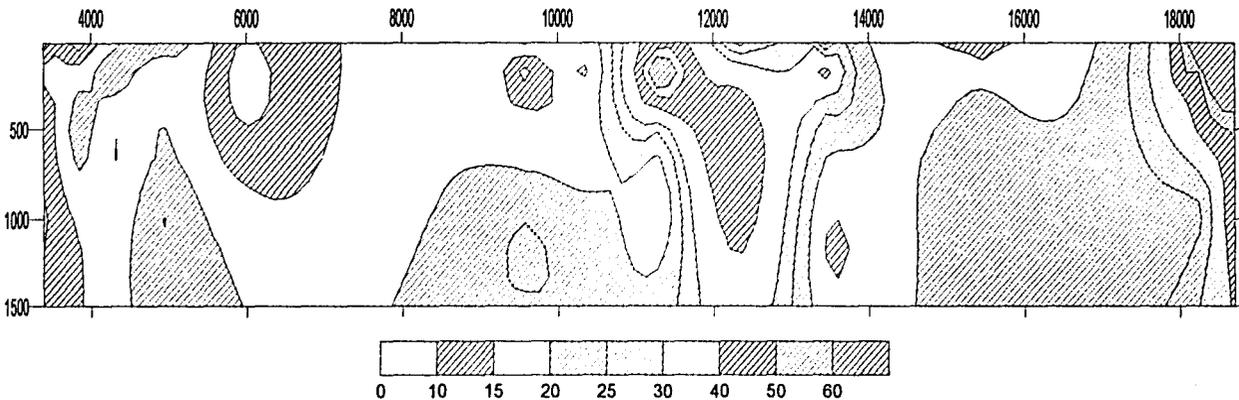
UNIDAD	RESISTIVIDAD (OHM-M)
0	18
1	80 - 128
2	1 - 17
3	41 - 360
4	1 - 15
5	197 - 198
6	8 - 10

Fig. 4.8

CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE



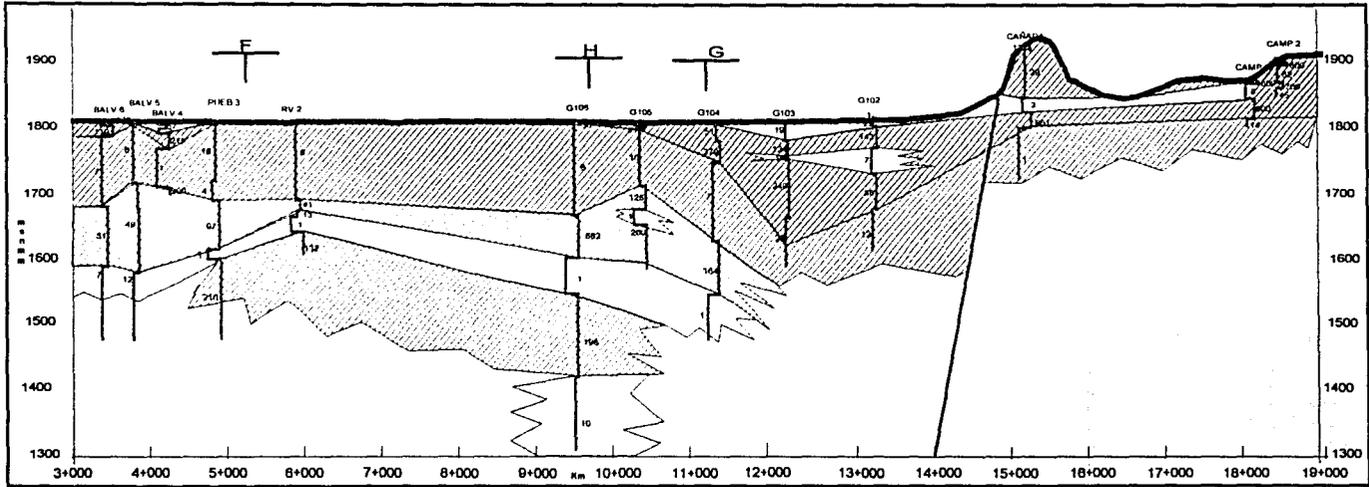
SEUDOSECCIÓN DE ISORRESISTIVIDADES APARENTES



D - D'

Figura 4.9 Seudosección de isorresistividades aparentes

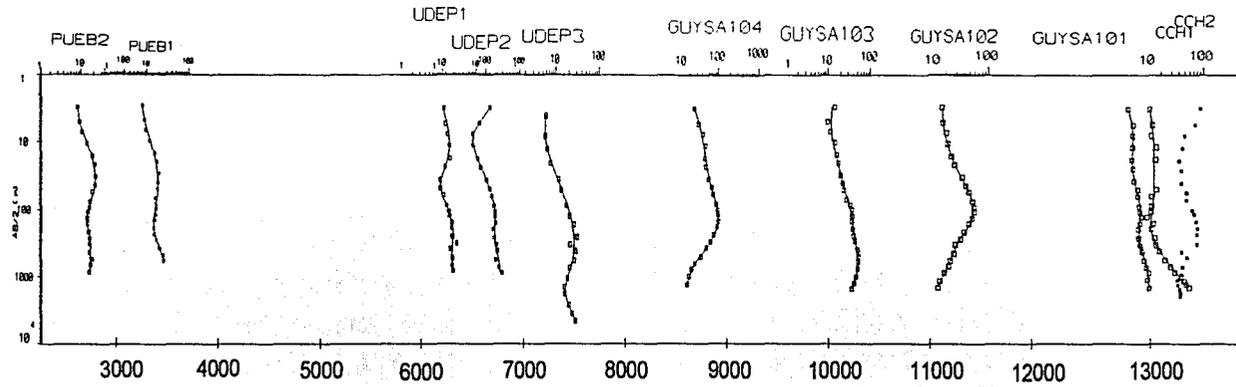
SEUDOSECCIÓN GEOELÉCTRICA D - D'



UNIDAD	RESISTIVIDAD (OHM-M)
0	3 - 22
1	29 - 800
2	1 - 16
3	31 - 560
4	1 - 13
5	132 - 210
6	10

Fig. 4.10

CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE



SEUDOSECCIÓN DE ISORRESISTIVIDADES APARENTES

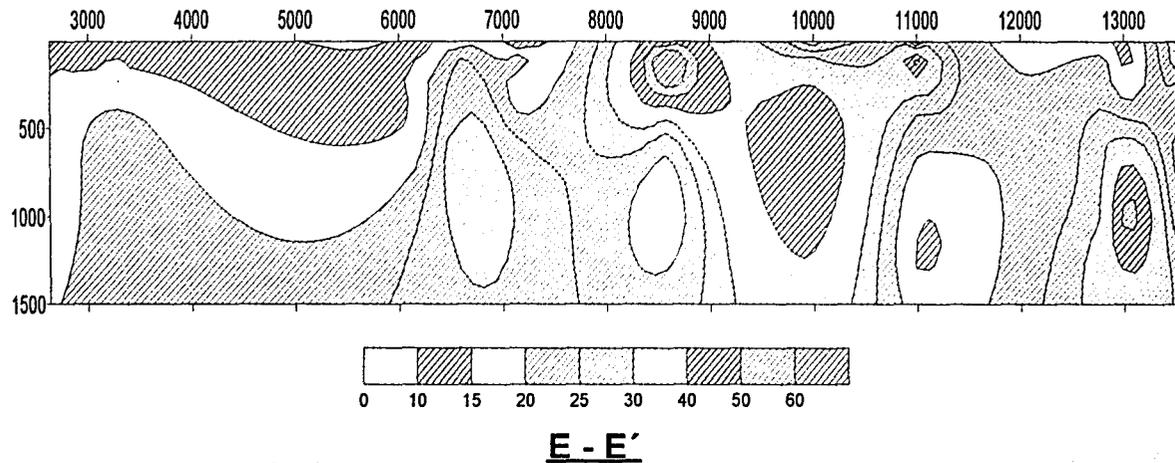
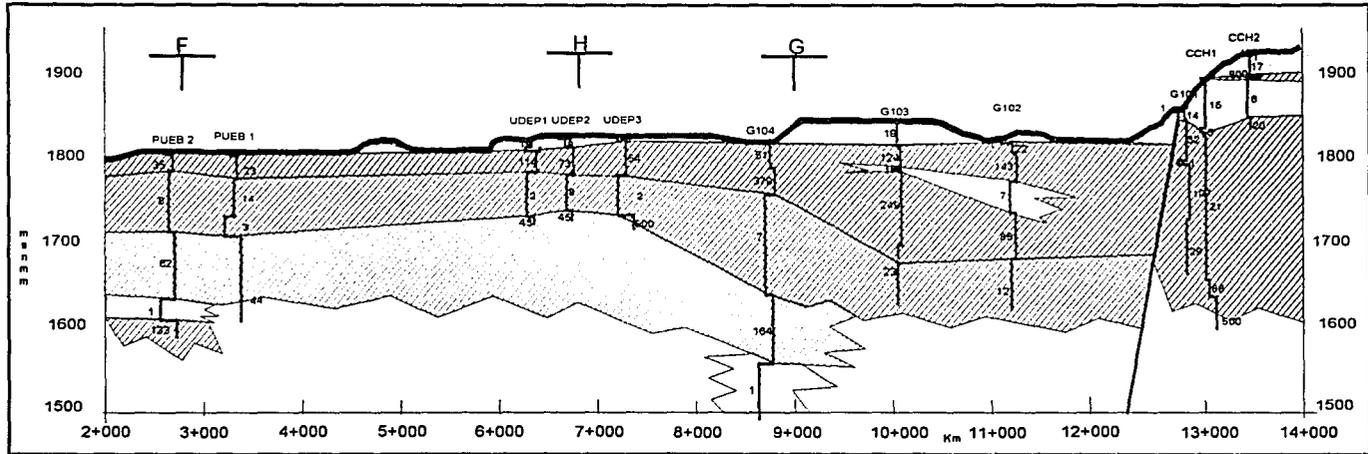


Figura 4.11 Seudosección de isorresistividades aparentes

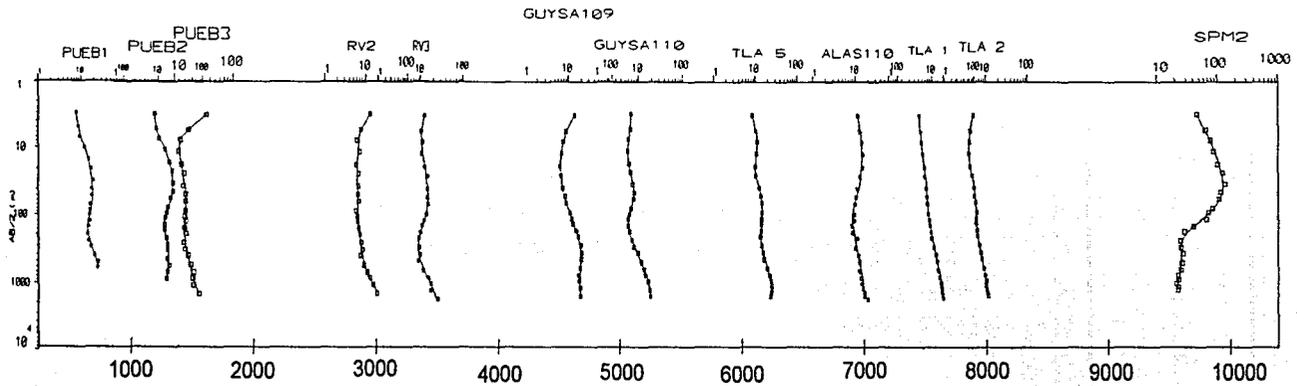
SEUDOSECCIÓN GEOELÉCTRICA E - E'



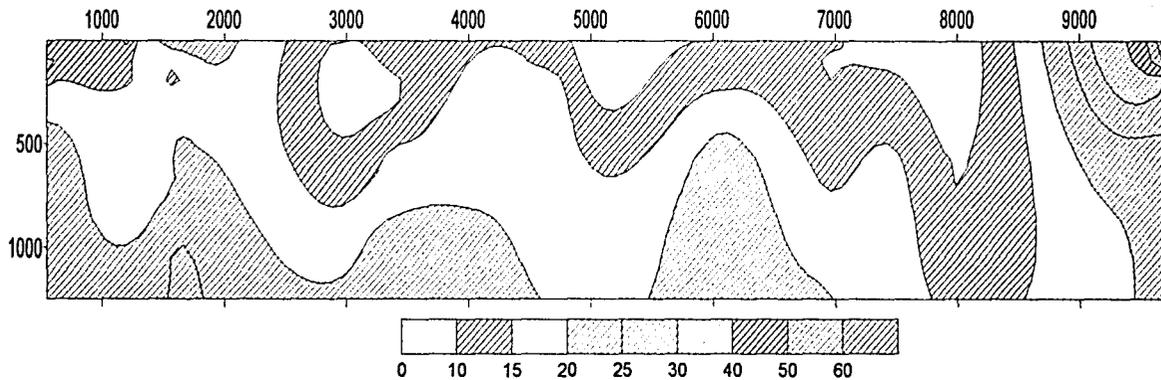
UNIDAD	RESISTIVIDAD (OHM-M)
0	1 - 19
1	23 - 800
2	2 - 14
3	43 - 500
4	1
5	133

Fig. 4.12

CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE



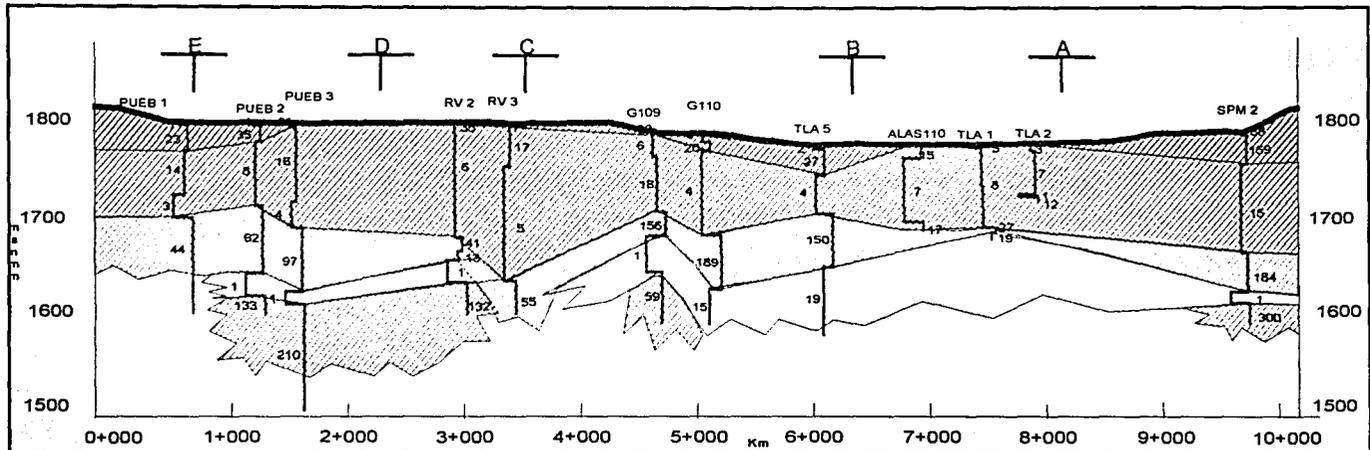
SEUDOSECCIÓN DE ISORRESISTIVIDADES APARENTES



F - F'

Figura 4.13 Seudosección de isorresistividades aparentes

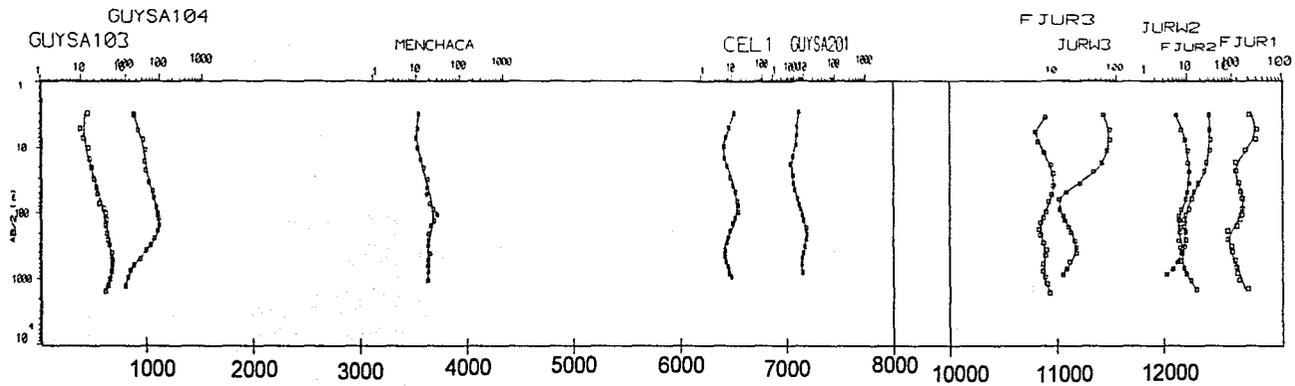
SEUDOSECCIÓN GEOELÉCTRICA F - F'



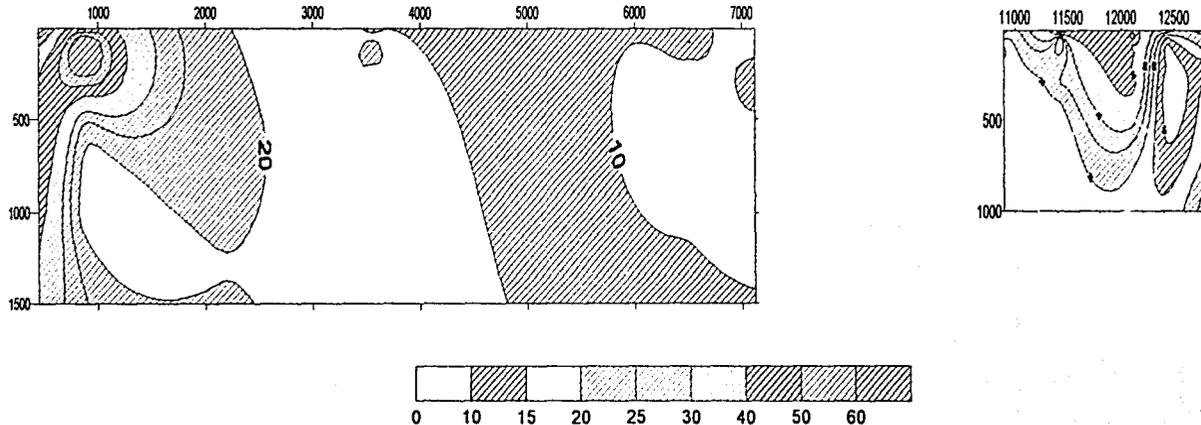
UNIDAD	RESISTIVIDAD (OHM-M)
1	23 - 159
2	1 - 18
3	27 - 189
4	1 - 19
5	59 - 300

Fig. 4.14

CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE



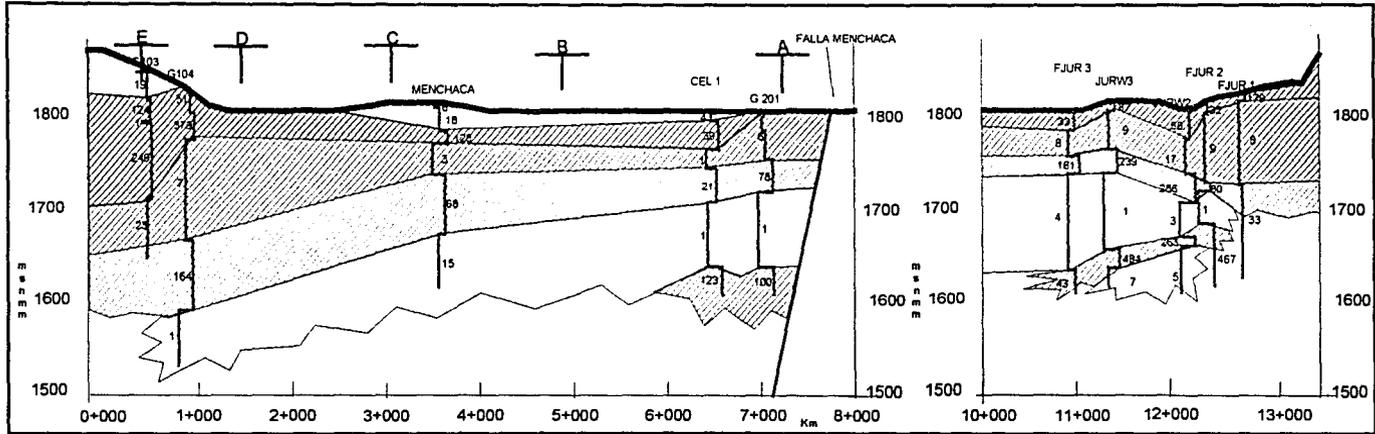
SEUDOSECCIÓN DE ISORRESISTIVIDADES APARENTES



G - G'

Figura 4.15 Seudosección de isorresistividades aparentes

SEUDOSECCIÓN GEOELÉCTRICA G - G'



UNIDAD	RESISTIVIDAD (OHM-M)
0	4 - 19
1	32 - 379
2	1 - 17
3	41 - 286
4	1 - 15
5	43 - 484
6	5 - 7

Fig. 4.16

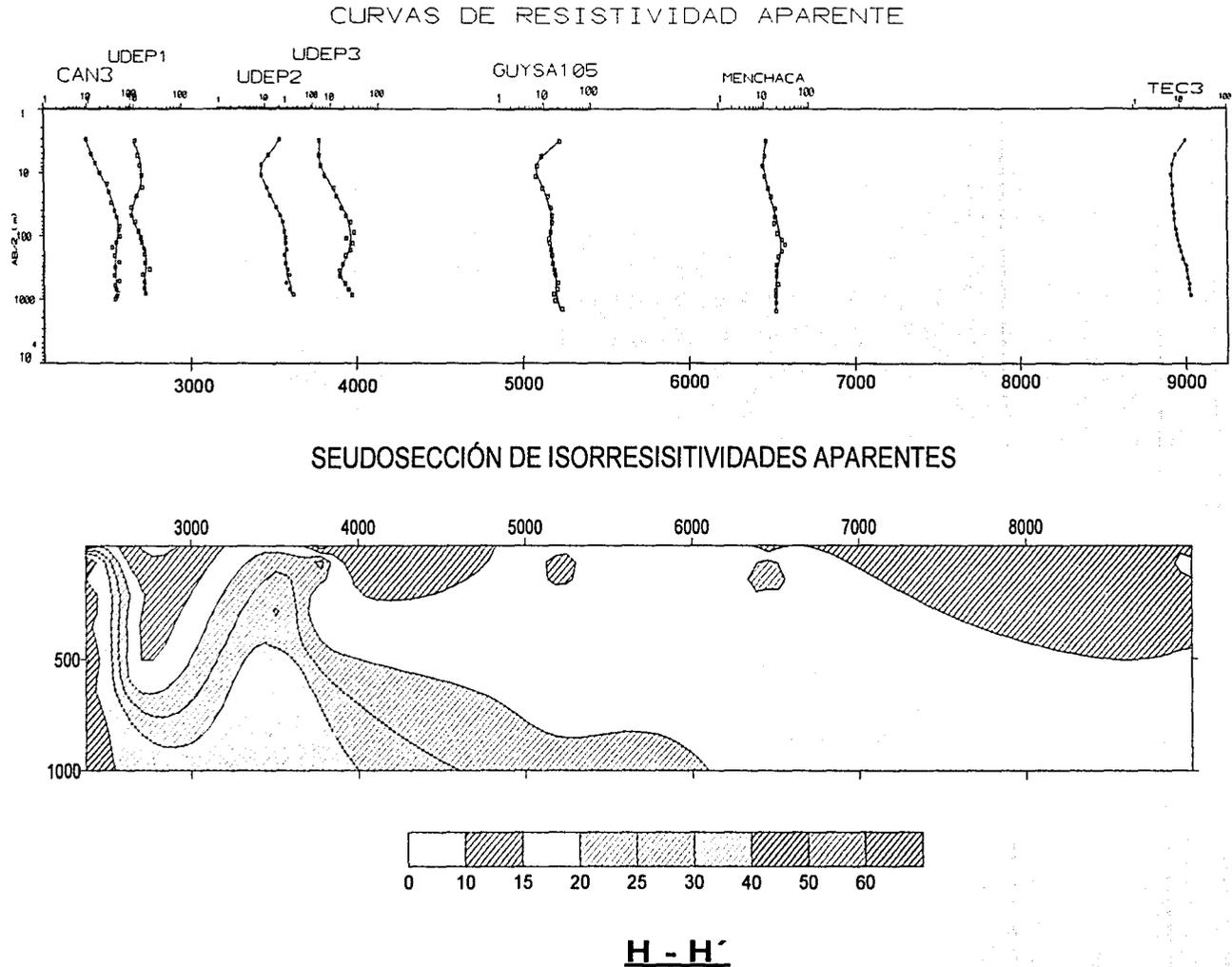
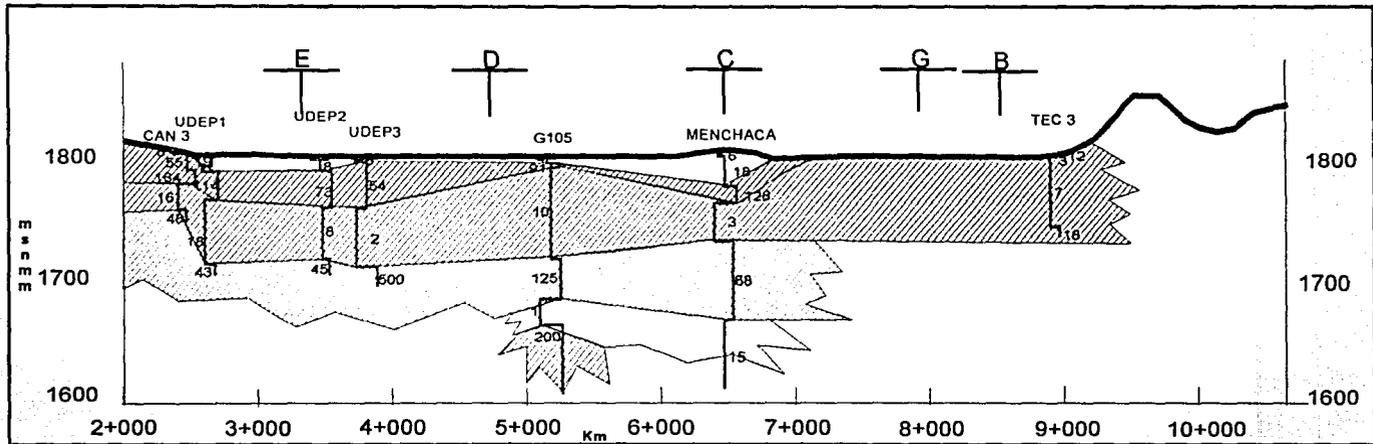


Figura 4.17 Seudosección de isorresistividades aparentes

SEUDOSECCIÓN GEOELÉCTRICA H - H'



UNIDAD	RESISTIVIDAD (OHM-M)
0	1 - 19
1	54 - 164
2	2 - 18
3	43 - 500
4	1 - 15
5	200

Fig. 4.18

## CAPITULO V.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS.

#### 5.1 Integración Geológico – Geofísico - Geohidrológico.

Partiendo de los perfiles geoelectrónicos, y basándose en las secciones geológicas previas, elaboradas mediante la información litológica de pozos, se integró la información obteniendo ocho secciones geológicas-geofísicas.

Cinco de estas secciones presentan un rumbo preferencial Este – Oeste, cortando, en su mayoría, las fallas Tlacote y Querétaro, de tal manera que la parte modelada, es la que corresponde al Graben de Querétaro, que, tal como se estableció en el Capítulo III, es donde se encuentra el acuífero del valle de Querétaro.

Las tres secciones restantes, tienen un rumbo preferencial Norte – Sur, y fueron elaboradas con el fin de darle un seguimiento espacial a las unidades.

Cabe destacar que la interpretación de los cortes geológicos partió de considerar como sedimentos vulcanolacustres (Svl) a las areniscas y conglomerados cenozoicos, en donde se agrupan areniscas, arcillas, conglomerados, tobas de caída y material piroclástico retrabajado. De igual manera, se consideró como pertenecientes a esta unidad la presencia de basaltos-andesíticos sumamente alterados y fracturados, partiendo del análisis del contraste de resistividades, en donde se detectaron resistividades para cuerpos con dichas características, relativamente bajas, si se consideran las registradas para aquellos cuerpos densos y compactos.

Se agregó la información de la profundidad del nivel estático, registrada para diciembre de 1995, en cada una de las secciones, con el fin de relacionar las unidades propuestas con sus características hidrogeológicas.

#### Sección A – A´.

Tiene una longitud de 8 km, presenta una orientación preferencial E - W, está construida con base en ocho sondeos eléctricos verticales, así como en siete cortes litológicos, cuyas profundidades no rebasan en general, los 250 metros, sin embargo, dicho perfil cuenta con la información del pozo Santa María Magdalena 3, cuya profundidad es de 500 metros (**figura 5.1**).

Se detectaron ocho paquetes rocosos, primeramente un cuerpo de material no consolidado, asociado a material aluvial (al), registrado bajo casi todos los sondeos y por los cortes litológicos, su espesor en promedio no rebasa los 4 metros, en la **figura 5.1**, no es posible apreciarlo debido a la escala empleada; posteriormente, aflorando en un área relativamente pequeña, se encuentra un paquete asociado a material vulcanolacustre (Svl1) cuyo espesor no rebasa los 20 m, registrado únicamente por los sondeos eléctricos; subyaciendo dichos sedimentos, se presenta una colada basalto andesítica (B 1), se presenta también en los altos topográficos; bajo este paquete encontramos de forma continua sedimentos vulcanolacustres (Svl 2) con un espesor considerable.

Bajo la capa identificada como Svl2 se encuentra una colada basáltica B2, continua a lo largo del perfil, se acuña bajo el sondeo TLA1; dicha colada descansa sobre una capa de sedimentos vulcanolacustres (Svl3); bajo esta unidad se detecta, nuevamente, una colada basáltica, identificada como B3.

El pozo de mayor profundidad, destaca un espesor de más de 200 metros para la última capa de sedimentos vulcanolacustres (Svl 4), la cual se presenta a más de 200 metros de profundidad.

La profundidad del nivel estático, se encuentra a cerca de 100 metros, se encuentra dentro del paquete B 2, siguiendo la geometría del paquete Svl 3, el cual se encuentra, para esta sección, a una profundidad menor.

### **Sección B – B´.**

Esta sección tiene 11 km de longitud aproximadamente y se basa en la información de once pozos con corte litológico, cuyas profundidades van de 200 a 300 metros. La orientación preferencial del corte es W-E, paralela a las secciones anteriores (**figura 5.2**).

Se identifican siete paquetes rocosos, siendo el primero, en superficie, el paquete asociado a materiales aluviales (al), seguido de basalto andesítico (B 1), justo en las proximidades de la falla Tlacote. Por debajo se encuentra de forma continua, y hacia el este aflorando en superficie, el segundo paquete de sedimentos vulcanolacustres (Svl 2).

Al igual que en la sección anterior, A – A´, la disposición de las capas es alternada, es decir, una capa de sedimentos vulcanolacustres, seguida de una colada basáltica. La geometría se mantiene, siendo la continuidad lateral el rasgo más importante

Para esta sección, se observa que el nivel estático se encuentra dentro de la capa B 2, a una profundidad promedio de 100 metros, sin embargo, es apreciable un

fuerte abatimiento en la zona de alta densidad de pozos, en donde llega al límite superior del paquete Sv1 3, a casi 130 metros de profundidad.

### **Sección C – C'.**

Tiene una longitud aproximada de 19 km y fue elaborada con la información de trece pozos con corte litológico y siete sondeos eléctricos verticales; la orientación es Este – Oeste (**figura 5.3**).

Uno de los rasgos principales, es la ocurrencia de un paquete de sedimentos vulcanolacustres, clasificado como Sv1 1, el cual sobreyace al paquete basalto - andesítico B 1.

El espesor de la capa SVL2 es considerablemente mayor al registrado para las secciones anteriores.

La capa Sv13 se presenta a cerca de 350 metros de profundidad, dicha capa es registrada únicamente por los sondeos G107 y G106, cuya profundidad de penetración alcanzó los 400 m.

Hacia el Oeste de la falla Tlacote, se cuenta con la información de tres cortes litológicos, sin embargo, la interpretación de la disposición de las capas resulta difícil, debido a que no se cuenta con más información para una correlación correcta.

### **Sección D – D'.**

La orientación general es Este – Oeste con poco más de 19 km de longitud. Se basa en la información litológica de 16 pozos, así como en la interpretación de 13 sondeos eléctricos verticales (**figura 5.4**).

Una de las características principales, es el aumento del espesor del paquete B 1, teniendo su máximo en las proximidades de la falla Querétaro, en la Cañada de la Virgen, donde se aprecia de más de 100 metros.

La interpretación de la disposición de los paquetes identificados, resulta más confiable, tanto para el poniente de la falla Tlacote, como para el oriente de la falla Querétaro. En ambos casos se aprecia la acción de las fallas sobre las unidades.

La profundidad del nivel estático, tiene un comportamiento similar al registrado para las secciones anteriores, presentándose alrededor de los 100 metros de profundidad, sin embargo, para las inmediaciones de la falla Querétaro, se presenta a menos de 50 metros, debido, probablemente, a la presencia de un cuerpo

lenticular de tobas y tezontle, así como al aumento del espesor del paquete de sedimentos vulcanolacustres Sv1 3.

### **Sección E – E´.**

Tiene una longitud de 19 km, con una orientación general E – W. Fue elaborada con la información de 15 cortes litológicos de pozos, y con la interpretación de 11 SEV (**figura 5.5**).

Se aprecia un decremento en el espesor del paquete Sv1 2, mientras que no es posible determinar la continuidad lateral de los sedimentos vulcanolacustres que conforman el paquete Sv1 3.

Predominan, en espesor, las coladas basálticas, debido a la cercanía con el volcán Cimatario.

El comportamiento de la profundidad del nivel estático es constante, se presenta a los 100 metros, asociado al paquete B 2.

### **Sección F – F´.**

Esta sección tiene aproximadamente 10 km de longitud, corta a todas las secciones antes descritas, por lo que su orientación preferencial es Norte – Sur (**figura 5.6**).

El objetivo de dicho perfil, es el de darle un seguimiento espacial a los paquetes.

El comportamiento de los paquetes es congruente con el observado en la dirección Este – Oeste.

La profundidad del nivel estático está claramente asociado a la relación entre el paquete de sedimentos vulcanolacustres Sv1 2, y el paquete basalto andesítico B 2, pues se presenta en el límite superior de éste último.

### **Sección G – G´.**

Tiene una orientación general N – S, con una longitud aproximada de 13 km (**figura 5.7**).

Puede observarse, de igual manera, un comportamiento congruente de los paquetes identificados, por lo que se puede hablar de una continuación no sólo lateral, sino espacial.

Nuevamente, se observa la profundidad del nivel estático asociado al paquete B 2.

### **Sección H – H'.**

Tiene una longitud de poco más de 10 km, su orientación preferencial es NW-SE (figura 5.9).

En términos generales, la disposición de los paquetes sigue un comportamiento similar, y congruente, con el descrito para las secciones anteriores.

## **5.2 Modelo geológico – geofísico general.**

Una vez que se cuenta con el análisis detallado de cada una de las secciones geológicas – geofísicas elaboradas, se puede definir el modelo general geológico – geofísico para el acuífero del valle de Querétaro, y relacionarlo con el modelo conceptual hidrogeológico planteado en el capítulo III, en donde se dividen las unidades en medio poroso y medio fracturado.

Un dato importante que se debe destacar, es el hecho de que la unidad eléctrica o (cero), está asociada tanto a material aluvial, como al primer paquete de sedimentos vulcanolacustres (Sv1).

La unidad 6, no fue registrada mediante la interpretación de sondeos eléctricos verticales, su presencia se definió con base en información litológica de pozos.

En general, el modelo propuesto refleja la alternancia de sedimentos vulcanolacustres, de baja resistividad, y coladas basalto andesíticas, de alta resistividad; el rasgo principal observado en todas las capas es la continuidad lateral y superficial.

En la **tabla 5.2.1** se presenta el resumen de resultados obtenidos.

**MODELO GEOELÉCTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO**  
**TESIS PROFESIONAL**

UNIDAD	RESISTIVIDAD OHM/M	ESPESOR m	TIPO DE ROCA	CLASIFICACIÓN LITOLÓGICA	CLASIFICACIÓN HIDROGEOLOGICA
0	4 - 19	4 - 53	al, Svl 1	Suelo, boleos inestables, tepetate.	Medio poroso
1	23 - 379	3 - 194	B 1	Basalto - Andesita	Medio fracturado
2	1 - 19	20 - 110	Svl 2	Conglomerados, Arcillas, Arenas, Tobas, Tepetate, Depósitos vulcanoclásticos, basalto alterado.	Medio poroso
3	21 - 560	5 - 85	B 2	Basalto - Andesita	Medio fracturado
4	1 - 19	14 - 105	Svl 3	Conglomerados, Arcillas, Arenas, Tobas, Tepetate, Depósitos vulcanoclásticos, basalto alterado.	Medio poroso
5	43 - 484	22 - 127	B3	Basalto - Andesita	Medio fracturado
6	1 - 10	> 150	Svl 4	Conglomerados, Arcillas, Arenas, Tobas, Tepetate, Depósitos vulcanoclásticos, basalto alterado.	Medio poroso

**Tabla 5.2.1**

Una vez que se cuenta con la clasificación de las unidades, se puede generar un modelo interpretativo del comportamiento de las mismas; estableciéndose la presencia de estructuras que afectan su geometría.

Partiendo de un modelo simple, que establece que el depósito de las unidades es horizontal por naturaleza, se pueden identificar, en las secciones propuestas, estructuras que alteran dicha norma; sin olvidar que la escala vertical empleada se encuentra exagerada hasta 8 veces con respecto a la horizontal.

### **5.3 Determinación de capas índice.**

Uno de los objetivos planteados al inicio del trabajo de Tesis, fue la determinación de una capa índice de referencia, considerando como tal al basamento, o bien, cierta continuidad de las unidades.

Al analizar el modelo geológico – geofísico propuesto para el acuífero del valle de Querétaro, se descarta el basamento como capa índice, debido a que, a la profundidad de estudio, tanto de pozos como de sondeos eléctricos verticales, no se registró su presencia.

Partiendo de las características hidrogeológicas de las unidades descritas, así como de la continuidad espacial encontrada para las mismas, se pueden agrupar de la siguiente forma:

**Capas 0, 2, 4 y 6:** Constituyen un medio poroso, compuestas por materiales aluviales, conglomerados, arenas, arcillas, gravas y basalto alterado. Las capas 4 y 6 se encuentran saturadas, mientras que la capa 2 actúa como límite superior del nivel estático. Geoeléctricamente, tienen un comportamiento de baja resistividad con valores entre 1 y 19 Ohm-m . Se encuentran intercaladas con coladas basalto andesíticas.

**Capas 1, 3 y 5:** Constituyen un medio fracturado, compuesto principalmente por coladas basalto-andesíticas de alta resistividad, registrando valores entre 21 y 560 Ohm-m.

Considerando que la conductividad hidráulica de los medios porosos está en función de su distribución granulométrica, se decidió seleccionar a las capas de sedimentos vulcanolacustres como unidades de referencia.

Se presenta la modelación espacial esquemática de la unidad 2 (Svl2) (**figura 5.10**), así como de la unidad 4 (Svl3)(**figura 5.11**); la unidad 6 no puede ser modelada debido a falta de información, pues se desconoce su profundidad total.

Partiendo de esta diferenciación se puede apoyar el desarrollo de un modelo matemático de flujo hidráulico subterráneo para el acuífero del valle de Querétaro; modelo que no se realiza en el presente trabajo, debido a que el objetivo fue el generar un modelo geológico geofísico para determinar el comportamiento de las capas, así como su delimitación en el medio poroso y medio fracturado.

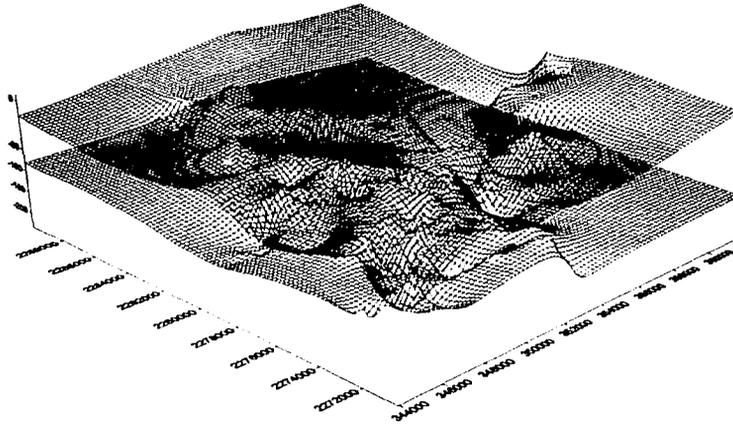


Figura 5.10 Modelo esquemático de la unidad Svl2

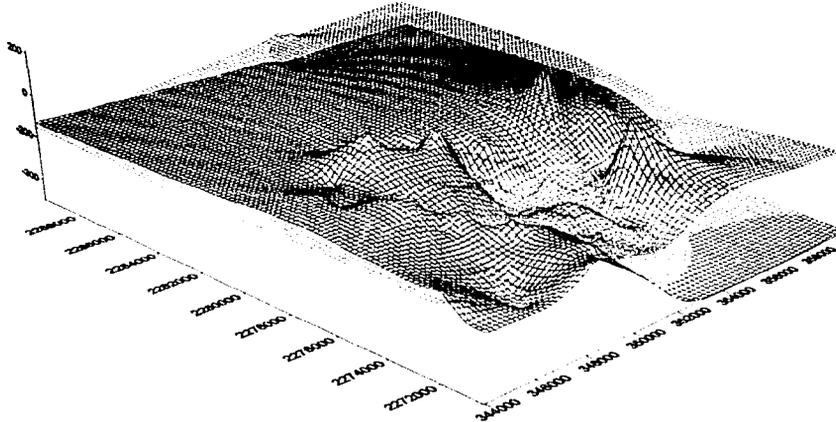


Figura 5.11 Modelo esquemático de la unidad Svl3

#### 5.4 Ubicación de zonas preferentes de explotación.

Como parte del análisis que se hace de la información geoelectrica, los mapas de resistencia transversal unitaria (T) de las capas que por su resistividad se correlacionan con el medio poroso del acuífero, resultan una herramienta cualitativa muy útil para la selección del área más favorable para la explotación.

Cuando se elabora el mapa de resistencia transversal unitaria dentro de una zona de estudio es necesario adoptar igual valor de resistividad "límite" para las capas seleccionadas. Esto permite visualizar con rapidez los lugares donde se presentan los valores máximos coincidentes con las mejores características geoelectricas (máximo espesor y baja resistividad).

Considerando que las capas seleccionadas corresponden a las clasificadas como pertenecientes al medio poroso, los valores de resistividad se encuentran entre 1 y 19 Ohm-m; por lo tanto, se puede elegir un valor promedio de 10 Ohm-m, con el fin de realizar una interpretación meramente cualitativa, considerando que los valores menores de 10 Ohm-m pueden representar un material arcilloso.

En la **figura 5.12** se presenta el mapa de resistencia transversal unitaria, donde se consideran únicamente los valores de transmisividad (Dar Zarrouk), correspondientes a las capas Svl2 (**figura 5.10**), Svl3 (**figura 5.11**), y valores puntuales correspondientes a Svl4, tomando, para esta capa, el menor espesor registrado.

De este mapa se puede observar que las zonas con mejores características para la explotación, son aquellas que se encuentran señaladas con recuadros, zonas en donde se asegura la presencia de capas pertenecientes al medio poroso, con los mayores espesores.

Se establecen 12 puntos en donde la extracción de agua resultaría más favorable:

	LOCALIZACIÓN	
1	350521	2282032
2	347235	2279071
3	350969	2280229
4	352864	2278687
5	357486	2278879
6	348460	2275726
7	350803	2275726
8	353197	2275469
9	359492	2276755
10	344619	2272060
11	347628	2273991
12	350022	2272705

Resulta evidente la relación existente entre los resultados obtenidos reflejados en el mapa de resistencia transversal, la geología del área de estudio, y la geomorfología. Los altos topográficos se distinguen por presentar resistencias transversales menores, lo cual indica que los espesores registrados para el medio poroso son mínimos.

Cabe mencionar que dicha interpretación es meramente una herramienta cualitativa; pues no considera al medio fracturado, medio que cuenta con una actividad geohidrológica considerable.

Una forma de darle validez a la interpretación de las zonas favorables para la extracción de agua, basada en el parámetro de Dar Zarrouk, es el demostrar la correspondencia entre el mapa de resistencia transversal (T) y el mapa de transmisividades hidráulicas.

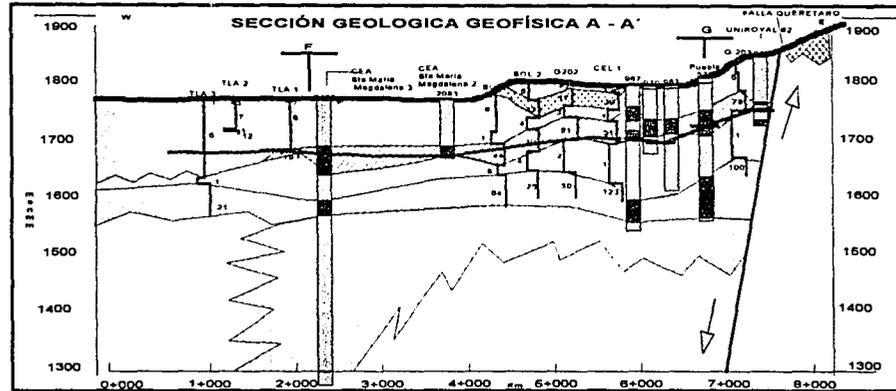
Se cuenta con la información de transmisividad, obtenida mediante pruebas de bombeo, de nueve pozos ubicados dentro del área de estudio, dicho valor se obtuvo para el medio poroso, en la **figura 5.13** se presenta el mapa de la ubicación de dichos pozos.

La información de transmisividades hidráulicas fue interpolada y los resultados se presentan en la **figura 5.14**, en donde las curvas generadas fueron sobrepuestas al mapa de resistencia transversal, obtenido como herramienta cualitativa.

Se puede apreciar con claridad, sin olvidar que sólo se cuenta con la información de transmisividad hidráulica para nueve pozos, la relación lineal y proporcional existente entre el parámetro de Dar Zarrouk (T) y la transmisividad de el medio poroso o granular.

De igual forma, es posible apreciar que, en general, la localización de los pozos coincide con las zonas marcadas como favorables para la explotación de agua (**figura 5.15**).

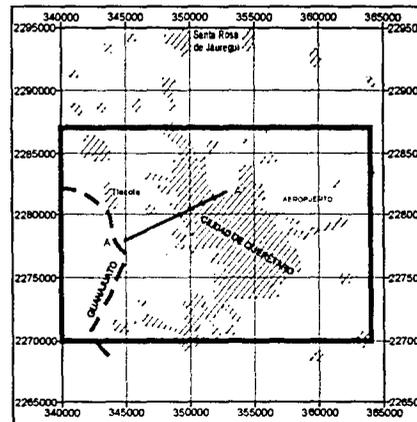
FIGURA 5.1



LITOLOGIA

- al Depositos aluviales
- Svl 1 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Unidad mas joven 1
- B 1 Colada basaltica 1 Colada mas joven
- Svl 2 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Segunda unidad
- B 2 Colada basaltica. Segunda Colada
- Svl 3 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Tercera Unidad
- B 3 Colada basaltica. Tercer Colada
- Svl 4 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Cuarta unidad

LOCALIZACIÓN.



SIMBOLOGÍA.

Profundidad del Nivel Estático diciembre de 1995

ESCALA NUMÉRICA

Escala Horizontal : 1 : 56 500

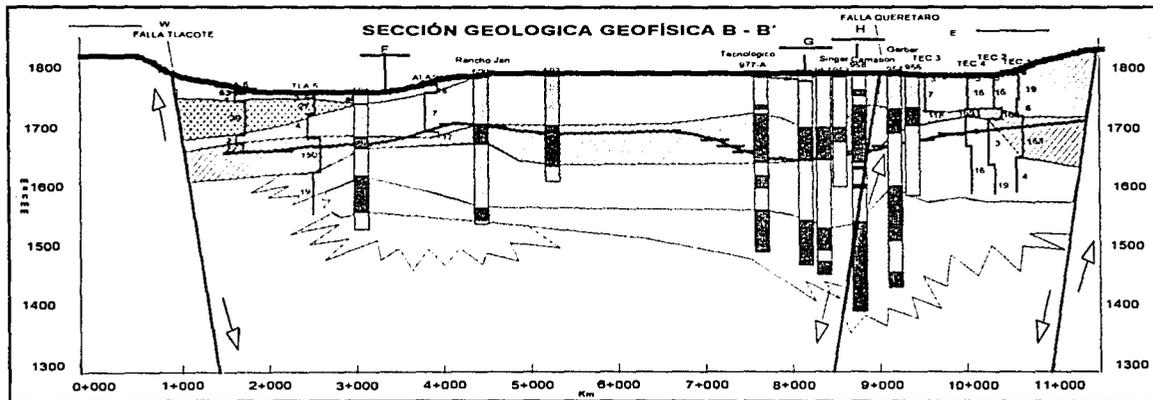
Escala Vertical : 1 : 10 500

La escala vertical se encuentra exagerada aproximadamente 5 veces con respecto a la horizontal

Sección geológica geofísica A - A'

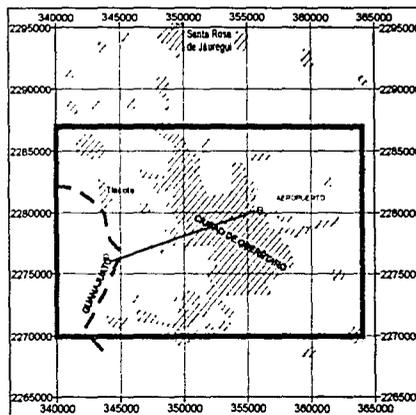
Valle de Querétaro.

FIGURA 5.2



- LITOLOGIA**
- al  Depositos aluviales
  - Svl 1  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Unidad mas joven 1
  - B 1  Colada basaltica 1 Colada mas joven
  - Svl 2  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Segunda unidad
  - B 2  Colada basaltica. Segunda Colada
  - Svl 3  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Tercera Unidad
  - B 3  Colada basaltica. Tercer Colada
  - Svl 4  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Cuarta unidad

**LOCALIZACIÓN.**



**ESCALA NUMÉRICA**  
 Escala Horizontal : 1 : 56 500  
 Escala Vertical : 1 : 10 500

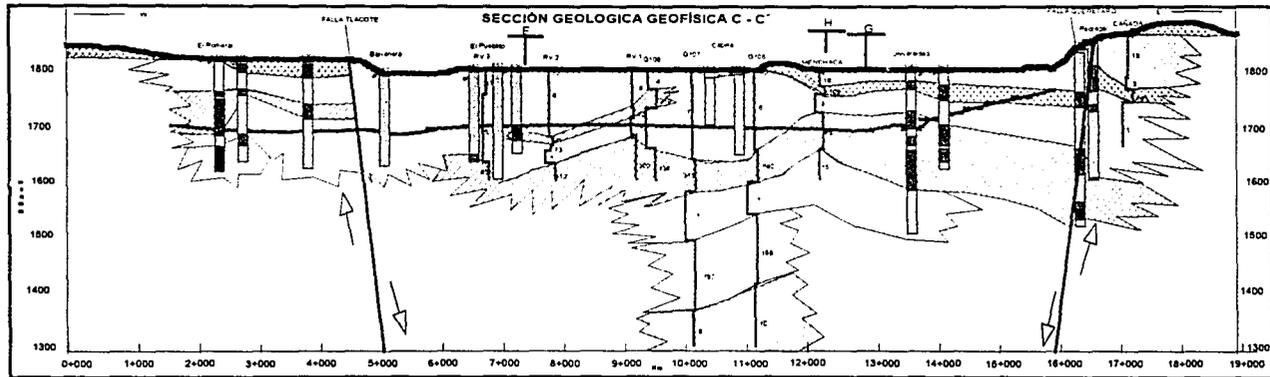
La escala vertical se encuentra exagerada aproximadamente 5 veces con respecto a la horizontal

**SIMBOLOGÍA.**

— Profundidad del Nivel Estático diciembre de 1995

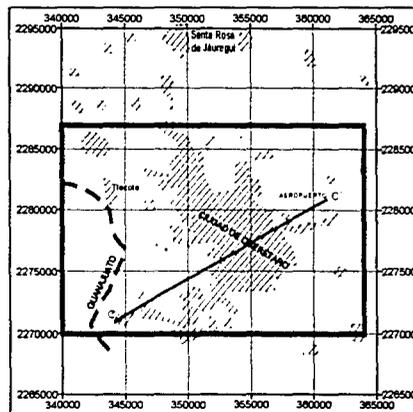
Sección geológica geofísica B - B'  
 Valle de Querétaro.

FIGURA 5.3



- LITOLOGIA**
- al  Depositos aluviales
  - Sv1  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Unidad mas joven 1
  - B1  Colada basaltica 1 Colada mas joven
  - Sv2  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Segunda unidad
  - B2  Colada basaltica. Segunda Colada
  - Sv3  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Tercera Unidad
  - B3  Colada basaltica. Tercer Colada
  - Sv4  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Cuarta unidad

**LOCALIZACIÓN.**



**ESCALA NUMÉRICA**  
Escala Horizontal : 1 : 82 000  
Escala Vertical : 1 : 10 638

La escala vertical se encuentra exagerada aproximadamente 8 veces con respecto a la horizontal

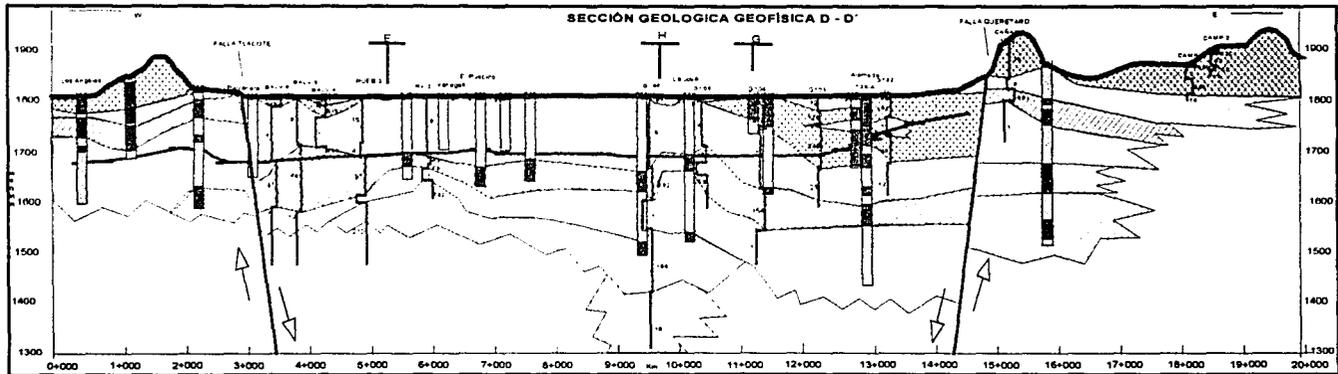
**SIMBOLOGÍA.**

— Profundidad del Nivel Estático diciembre de 1995

Sección geológica geofísica C - C'

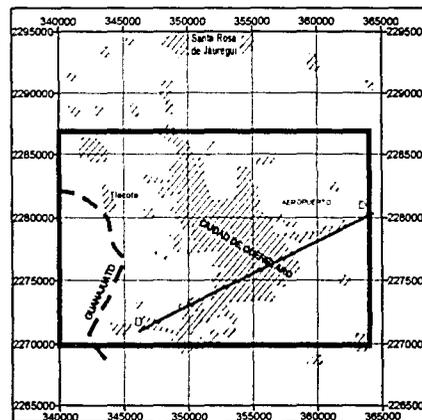
Valle de Querétaro.

FIGURA 5.4



- LITOLOGÍA**
- al  Depósitos aluviales
  - Svl 1  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Unidad mas joven 1
  - B 1  Colada basaltica 1 Colada mas joven
  - Svl 2  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Segunda unidad
  - B 2  Colada basaltica. Segunda Colada
  - Svl 3  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Tercera Unidad
  - B 3  Colada basaltica. Tercer Colada
  - Svl 4  Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Cuarta unidad

**LOCALIZACIÓN.**



**ESCALA NUMÉRICA**  
Escala Horizontal : 1 : 82 000  
Escala Vertical : 1 : 10 638  
La escala vertical se encuentra exagerada aproximadamente 8 veces con respecto a la horizontal

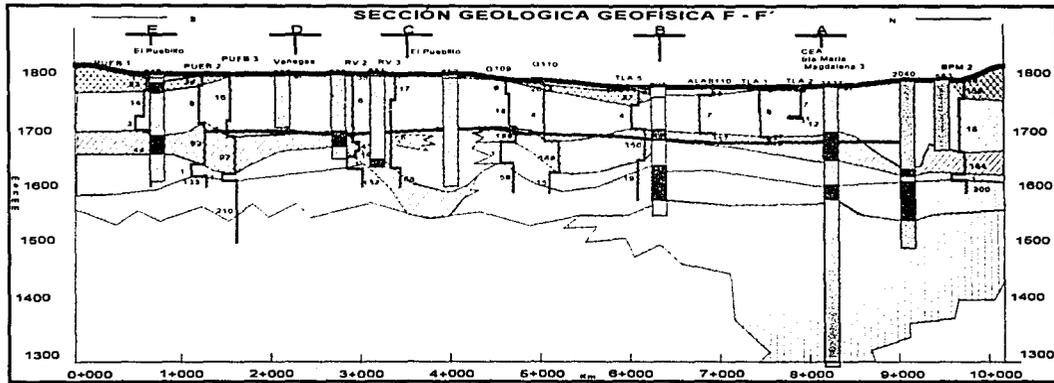
**SIMBOLOGÍA.**

— Profundidad del Nivel Estático diciembre de 1995

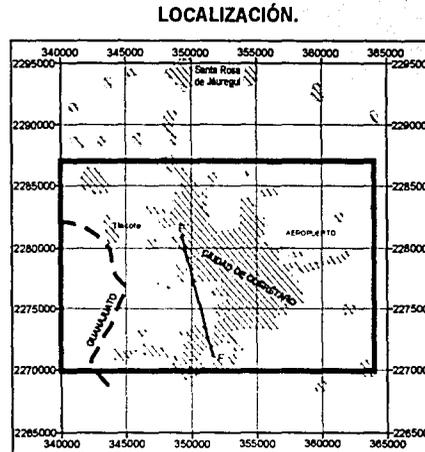
Sección geológica geofísica D - D'  
Valle de Querétaro.



FIGURA 5.6



- LITOLOGIA**
- al Depositos aluviales
  - Svl 1 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Unidad mas joven 1
  - B 1 Colada basaltica 1 Colada mas joven
  - Svl 2 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Segunda unidad
  - B 2 Colada basaltica. Segunda Colada
  - Svl 3 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Tercera Unidad
  - B 3 Colada basaltica. Tercer Colada
  - Svl 4 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Cuarta unidad



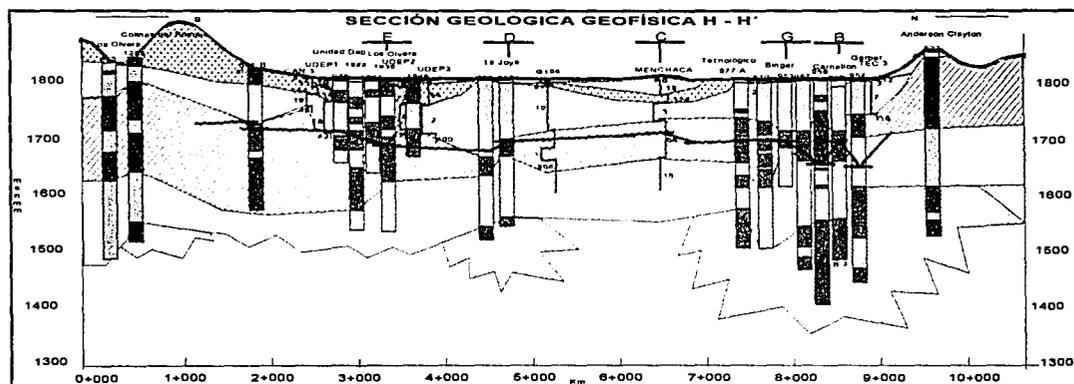
**ESCALA NUMÉRICA**  
Escala Horizontal : 1 : 56 500  
Escala Vertical : 1 : 10 500  
La escala vertical se encuentra exagerada aproximadamente 5 veces con respecto a la horizontal

**SIMBOLOGÍA.**  
— Profundidad del Nivel Estático diciembre de 1995

Sección geológica geofísica F - F'  
Valle de Querétaro.



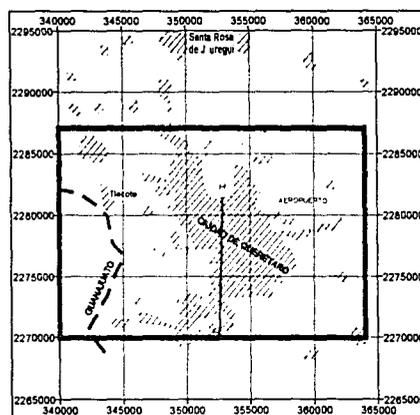
FIGURA 5.8



LITOLOGIA

- al Depositos aluviales
- Svl 1 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Unidad mas joven 1
- B 1 Colada basaltica 1 Colada mas joven
- Svl 2 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Segunda unidad
- B 2 Colada basaltica. Segunda Colada
- Svl 3 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Tercera Unidad
- B 3 Colada basaltica. Tercer Colada
- Svl 4 Sedimentos volcanoclasticos lacustres. Cuarta unidad

LOCALIZACIÓN.



SIMBOLOGÍA.

Profundidad del Nivel Estático diciembre de 1995

ESCALA NUMÉRICA

Escala Horizontal : 1 : 56 500

Escala Vertical : 1 : 10 500

La escala vertical se encuentra exagerada aproximadamente 5 veces con respecto a la horizontal

Sección geológica geofísica H - H'  
Valle de Querétaro.

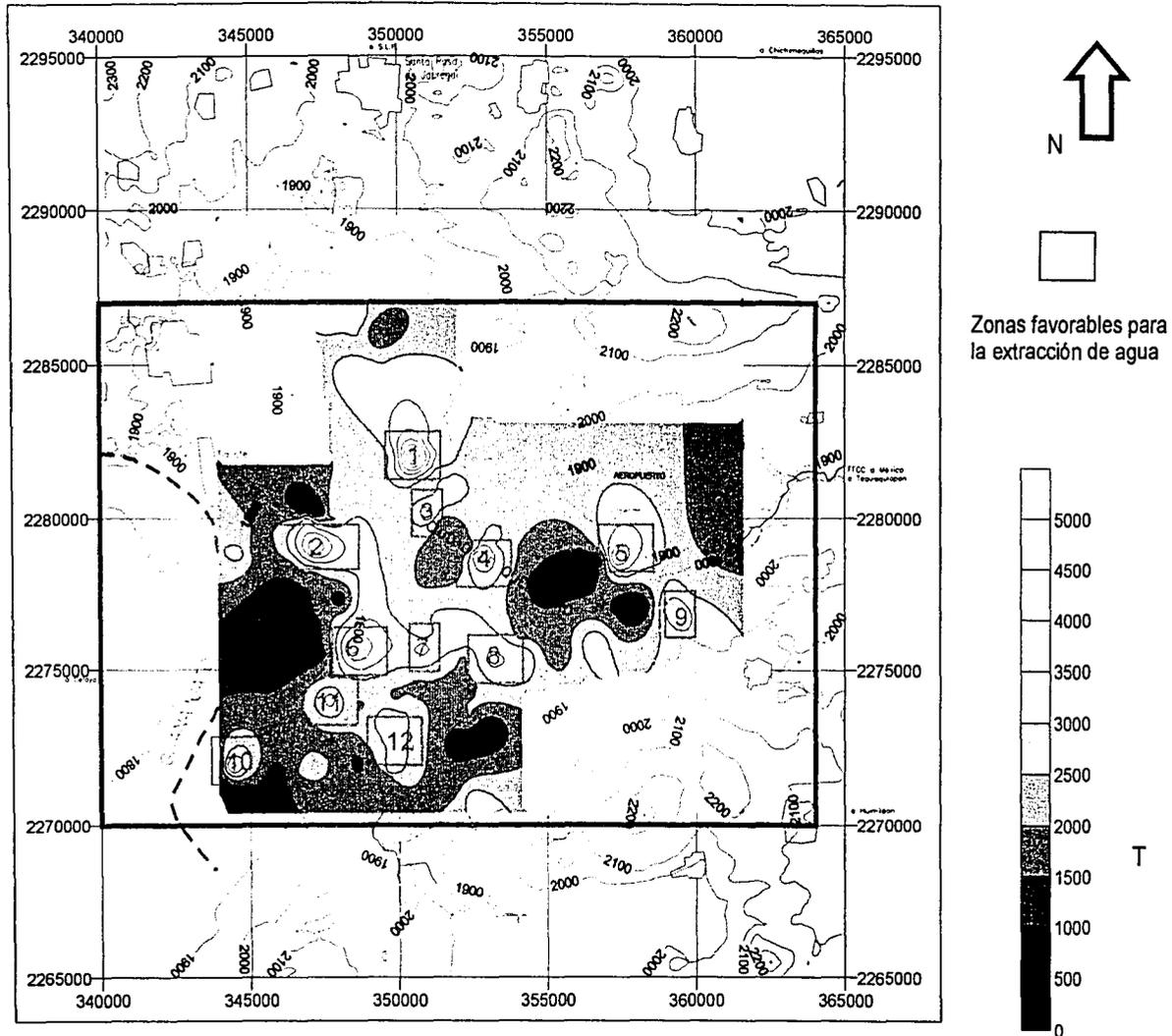


Fig. 5.12 Mapa de resistencia transversal unitaria del medio granular.

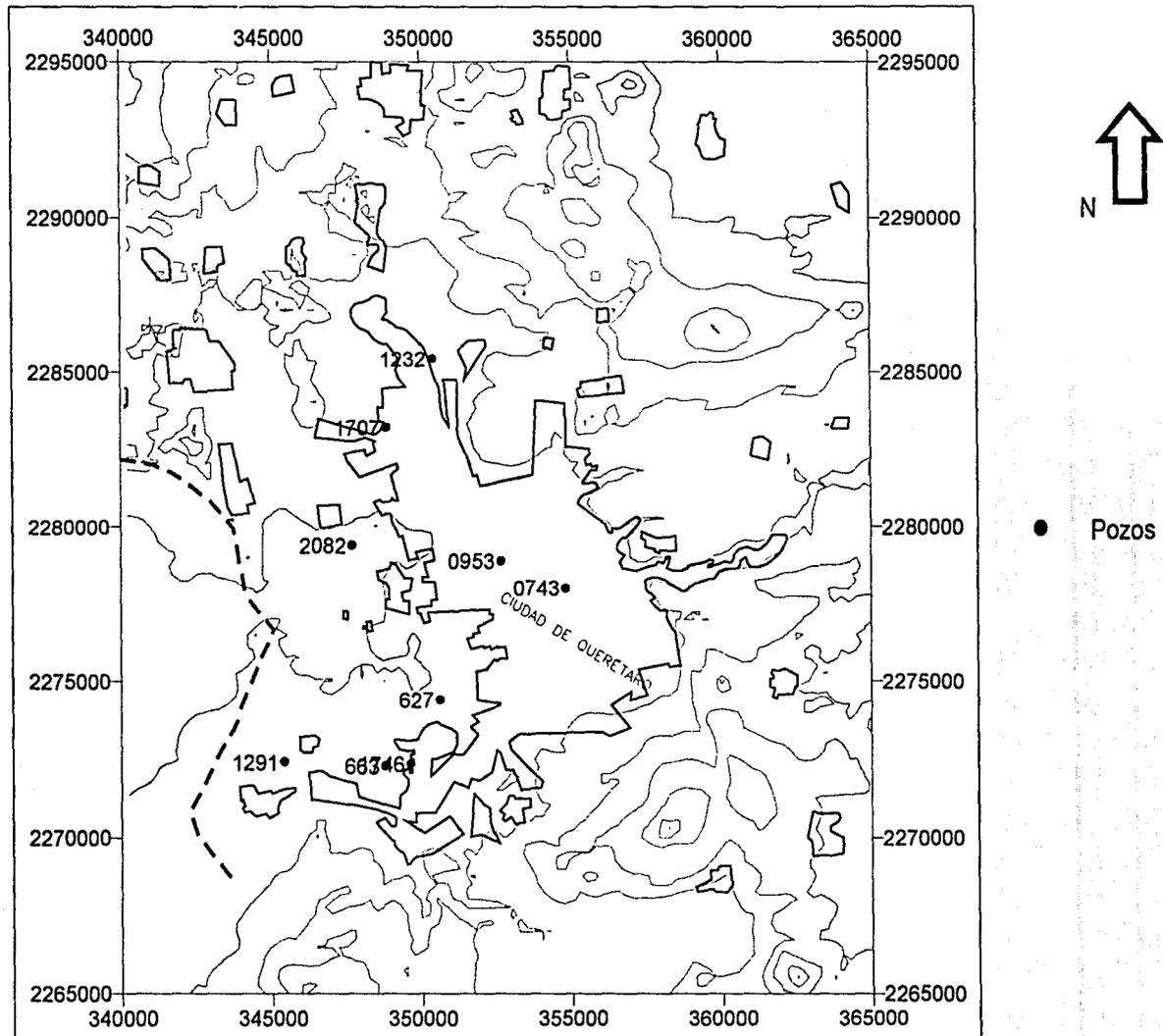


Figura 5.13 Localización de pozos con información de Transmisividad Hidráulica.

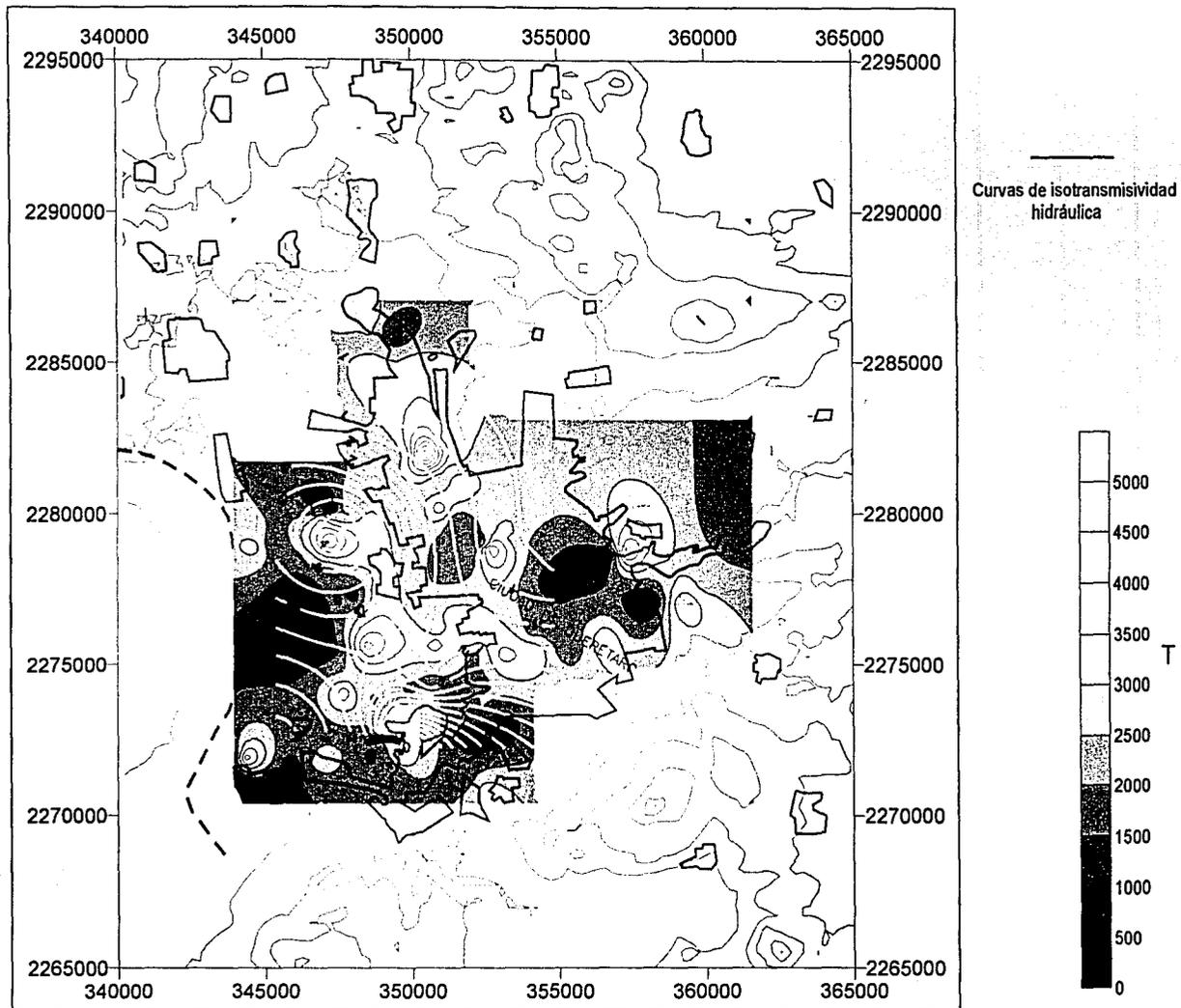


Figura 5.14 Relación entre el parámetro de Dar Zarrouk (T) y la transmisividad del medio granular.

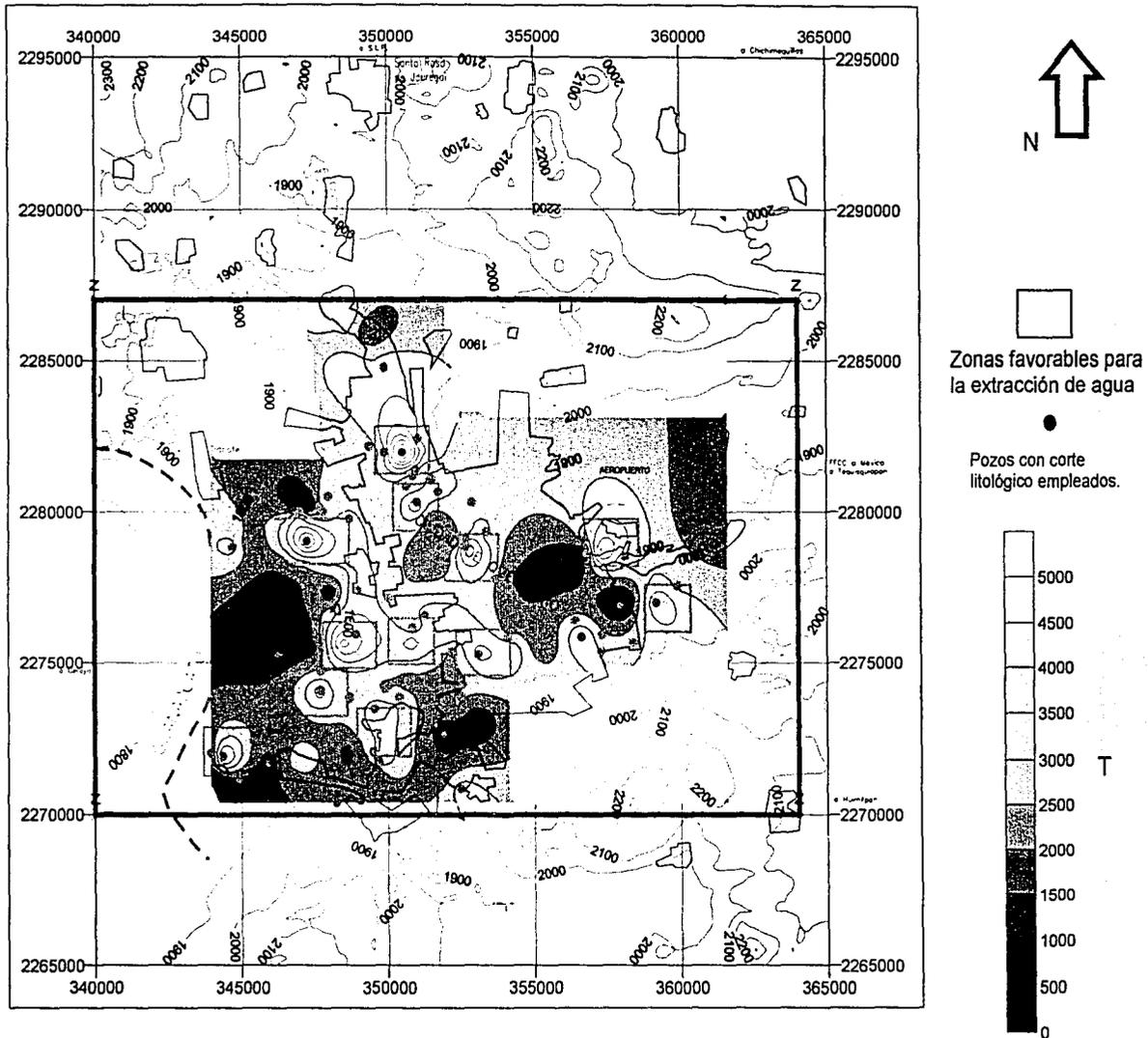


Fig. 5.15 Zonas favorables para explotación, y pozos perforados.

## CAPITULO VI.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 6.1 Conclusiones.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en la elaboración del presente trabajo, se presentan los más sobresalientes.

1. Se interpretó un modelo geoelectrico con base en 52 sondeos eléctricos verticales, identificándose 7 unidades. Las capas 0, 2, 4 y 6 presentan resistividades del orden de 1 a 19 ohm-m, dichas capas se encuentran asociadas a sedimentos vulcanolacustres, tobas, arcillas, gravas y basaltos sumamente alterados; se identifican mediante la siguiente nomenclatura, Sv1, Sv2, Sv3 y Sv4, respectivamente. Alternándose con las capas descritas, se presentan las unidades 1, 3 y 5, cuyas resistividades registran valores entre 21 y 560 ohm-m; están asociadas a coladas basalto-andesíticas, nombradas B1, B2 y B3, respectivamente.
2. El relleno de la fosa, identificado mediante cortes litológicos y sondeos eléctricos verticales hasta una profundidad de 400 m, está constituido por una alternancia de basaltos y sedimentos vulcanolacustres. Las capas interpretadas se caracterizan por la variación en sus espesores, pero presentan una apreciable continuidad lateral y superficial.
3. Considerando que la conductividad hidráulica de los medios porosos está en función de su distribución granulométrica, se decidió seleccionar a las capas de sedimentos vulcanolacustres como unidades de referencia, o capas índice.
4. La información referente a la profundidad del nivel estático empleada, es la obtenida para diciembre de 1995. Registrando profundidades, en promedio, entre 100 y 110 metros, desde la superficie del terreno.
5. Se establecen 2 capas índice, Sv2 y Sv3, la primera por su relación evidente con la profundidad del nivel estático, puesto que actúa como límite superior, mientras que la unidad Sv3 se encuentra saturada. Ambas presentan espesores variables, que van desde 20 hasta 110 metros.
6. La modelación geoelectrica del acuífero se centró en la delimitación de las unidades, diferenciándolas en medio poroso y medio fracturado. **Capas 0, 2, 4 y 6:** constituyen un medio poroso, compuestas por materiales aluviales, conglomerados, arenas, arcillas, gravas y basalto alterado. Las

capas 4 y 6 se encuentran saturadas, mientras que la capa 2 actúa como límite superior del nivel estático. Geoeléctricamente, tienen un comportamiento de baja resistividad con valores entre 1 y 19 Ohm-m. Se encuentran intercaladas con coladas basalto andesíticas. **Capas 1, 3 y 5:** constituyen un medio fracturado, compuesto principalmente por coladas basalto-andesíticas de alta resistividad, registrando valores entre 21 y 560 Ohm-m.

7. Las zonas preferentes para la extracción de agua son las siguientes. Se basan en los resultados obtenidos de la sumatoria de la resistencia transversal unitaria de las capas pertenecientes al medio granular, Svl2, Svl3 y Svl4.

	LOCALIZACIÓN	
1	350521	2282032
2	347235	2279071
3	350969	2280229
4	352864	2278687
5	357486	2278879
6	348460	2275726
7	350803	2275726
8	353197	2275469
9	359492	2276755
10	344619	2272060
11	347628	2273991
12	350022	2272705

8. Se logra la validación de la herramienta cualitativa anterior, mediante la comparación de los resultados obtenidos con la información de transmisividades hidráulicas de 9 pozos. Se comprueba el carácter proporcional y lineal de la relación  $T = K\sigma R$ .
9. Se homologaron los términos empleados en la caracterización de cortes geológicos, a través de la recopilación e interpretación de los mismos en una base de datos (**Anexo 1**).
10. Fue elaborada una base de datos de sondeos eléctricos verticales empleados, estableciéndose su abertura  $AB/2$ , equipo empleado, coordenadas, el estudio del cual se desprenden, y, finalmente, el modelo seleccionado (**Anexo 2**).
11. No se pudo determinar, mediante la información recabada, una capa impermeable que actuara como basamento del acuífero, por lo que se concluye que ésta existirá a profundidades mayores a 500 metros.

12. La abertura del arreglo del SEV, en algunos casos, no fue lo suficientemente grande para poder penetrar a mayor profundidad.
13. Los sondeos fueron realizados en campañas y años diferentes, la dinámica del acuífero muestra un acelerado abatimiento (mayor a 3.5 m por año), situación que no permitió definir el nivel estático, y por otra parte, al no contar con sondeos realizados en el mismo lugar, se desconoce si los valores de resistividad obtenidos, sobre todo en las primeras capas, se hayan alterado por la presencia de contaminantes.

## **6.2 Recomendaciones.**

Para modelar matemáticamente un acuífero es necesario contar con la información de la profundidad de la capa que actúa como basamento, lo que da lugar a las siguientes recomendaciones.

1. Realizar una campaña de exploración electromagnética para definir la profundidad al basamento, la cual se encuentra a más de 500 metros, específicamente en los sitios que se marcan como más favorables para la extracción de agua subterránea.
2. En caso de aplicarse la técnica del SEV para futuras localizaciones, la abertura AB deberá ser entre 3000 y 5000 m, la cual sugiere un equipo de alta potencia y alta resolución.
3. Es necesario contar con mayor cantidad de pruebas de bombeo para determinar la transmisividad hidráulica y correlacionarlas de mejor manera con la resistencia transversal.
4. Es recomendable realizar una campaña de sondeos eléctricos verticales en algunos sitios donde se realizaron con anterioridad, para conocer si existen variaciones en la respuesta del medio y poder apoyar, también, en la definición de zonas contaminadas.

## BIBLIOGRAFÍA.

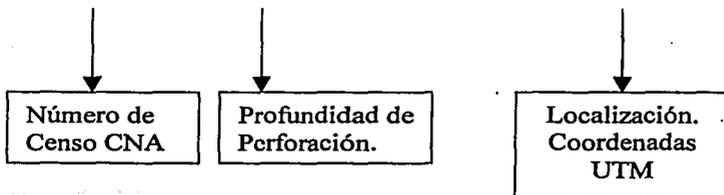
- Alaniz-Álvarez; Nieto-Samaniego; Reyes-Zaragoza; Orozco-Esquivel; Ojeda-García y L. Vassallo; 2001; Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México; Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 18, núm. 2, p. 129-148.
- Andesron, W. L., 1975. Improved digital filters for evaluating Fourier and Hankel transform integrals. U.S. Geol. Surv. rep. GD-75-012.
- Anderson, W. L., 1979. Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering. Geophysics, 44, 128 jul-1305.
- Carrasco-Núñez, G., Milán, M., y Verma P.S., 1989, Geología del volcán Zamorano, Estado de Querétaro; Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revisya, v.8, num.2, pp.194-201
- Carrillo-Martínez, Miguel, 1989, Estratigrafía y tectónica de la parte centrooriental del Estado de Querétaro; Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v.8, num.2 pp.188-193
- Cerca-Martínez, L.M. Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 2000, The geological evolution of the southern Sierra de Guanajuato; a documented example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: International Geology Review, 42, 131-151.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Carrasco-Núñez, G., 1999, Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: Geology, 27, 303-306.
- Ferrari, L., 2000, Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década; Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53(1), 84-92.
- Ghosh, D.P., 1971, The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements; Geoph. Prosp., 19, pp. 192-217.
- GUYSA S.A de C.V; 1990, Estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de la Red de Observación en los Acuíferos de Aguascalientes y Querétaro.

- **Henriet, J.P.; 1976; Direct Applications of the Dar Zarrouk Parameters in Ground Water Surveys; Geophysical Prospecting, v. 24, p. 344-353.**
- **Inman, J.R., Ryu S.H. Wars, 1973; Resistivity inversion. Geophysics, 38, p.1088-1108.**
- **Inman, J.R., 1975; Resistivity inversion with ridge regression. Geophysics, 40, p.798-817.**
- **Koefoed, O. 1979. Geosounding Principles, 1: Resistivity Sounding Measurements. Elsevier. Amsterdam. 276 pp.**
- **Lesser-Illades, Juan Manuel; 2001, Resumen de las principales características hidrogeológicas del acuífero del Valle de Pénjamo-Abasolo, Gto. Notas del XIII Curso Internacional en Contaminación de Acuíferos.**
- **López-Hernández, A., 1996, Modelo geológico de un sistema hidrotermal no volcánico; San Bartolomé de los Baños, Gto., México; Geotermia, 12, 19-32.**
- **Lopez-Ramos, E. 1982. Geología de México, Tomo I, 3a ed., México, D.F., México.**
- **Maillet, R; 1947; The Fundamental equations of electric prospecting, Geophysics, 12, p.524-556.**
- **Nieto-Samaniego, A.F., 1990, Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la parte sudoriental de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 9, 146-155.**
- **Nieto-Samaniego, A.F., Macías-Romo, C., Alaniz-Alvarez, S.A., 1996, Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 13, 117-122.**
- **Niwas, Sri and Singhal, D.C.; 1981, Estimation of Aquifer Transmissivity from Dar Zarrouk parameters in Porous Media; Journal of Hydrology, v.50p. 393-399.**
- **Niwas, Sri and Singhal, D.C.; 1985, Aquifer Transmissivity of Porous Media from Resistivity Data; Journal of Hydrology, v. 82, p. 143-153.**
- **Orellana, E. 1982 Prospección geoelectrica por corriente continua. Paraninfo, Madrid, págs. 340.**

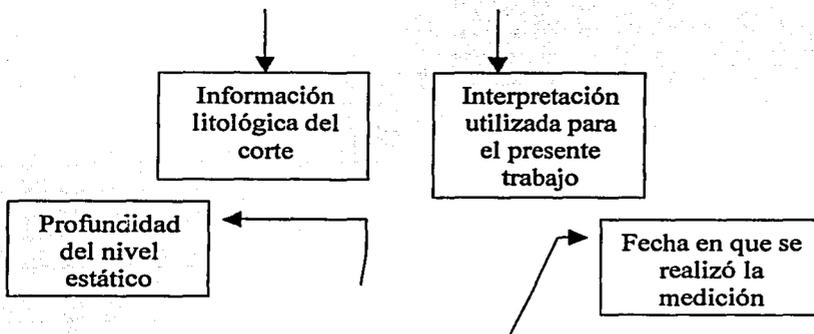
- Pasquarè, G., Ferrari, L., Garduño, V.H., Tibaldi, A., Vezzoli, L., 1991, Geology of the central sector of the Mexican Volcanic belt, States of Guanajuato and Michoacán: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Map and Chart series, MCH072, 1 map and text, 22 p.
- Reyes-Zaragoza, M.A., 2001, Estudio geológico-estructural de los sistemas de fallas de Querétaro, Qro.: Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis profesional, 89 p.
- Rodríguez-Herrera, Sergio; 1985, Tesis; Efecto de un contacto lateral en curvas de sondeos eléctricos. UNAM. Facultad de Ingeniería.
- Roy, A; and Apparao, A; 1971, Depth of investigation in direct current methods, Geophysics, v. 36, pp. 943-958.
- Steinich, Birgit; Bocanegra, Gerardo; and Sánchez, Eva; 1999; Basement topography and fresh-water resources of the coastal aquifer at Acapetahua, Chiapas, Mexico; Geofísica Internacional, v. 38, Num. 2, pp. 107-115.
- Telford, W.M.; L.P. Geldart; R.E. Sheriff and D.A. Keys; Applied Geophysics, 2nd ed. Cambridge U. Press, Cambridge.
- Valdéz-Moreno, G., Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 1998, El volcán La Joya, Estados de Querétaro y Guanajuato—un estrato volcán miocénico del cinturón volcánico mexicano: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 15(2), 181-197.
- Vassallo, L.F., Solís, S. Garduño, C., 1998, Geología de la Sierra de los Cuarzos, límite Guanajuato-Querétaro, in Alaniz-Álvarez, S.A., Ferrari, L., Nieto-Samaniego, A.F. (eds.), Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, Libro de resúmenes: México, D.F., Sociedad Geológica Mexicana, p. 107. (resumen).
- Zohdy, Adel A.R., 1974., Use of Dar Zarrouk curves in the interpretation of vertical electrical soundings; U.S. Geol.Surv. Bull; 1313-D.
- Zohdy, A. A. R., 1989. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. Geophys., 54, 2, 245-253.

**EJEMPLO DE INFORMACIÓN EN ANEXO 1.**

NUM D POZO	PROFUNDIDAD	PROPIETARIO	LOCALIZACIÓN	
0967	255,00	CARDANES	350628,10	2280860,03



profundidad	roca	INTERPRETACIÓN
0 - 15	ARCILLA	Svl
15 - 27	PIROCLASTOS	
27 - 39	ARCILLA	B
39 - 63	BASALTO	
63 - 80	PIROCLASTOS	Svl
80 - 94	BASALTO	B
94 - 101	PIROCLASTOS	Svl
101 - 145	ARCILLA	
145 - 170	PIROCLASTOS	
170 - 201	ARCILLA	B
201 - 239	BASALTO	
239 - 255	ARCILLA	Svl

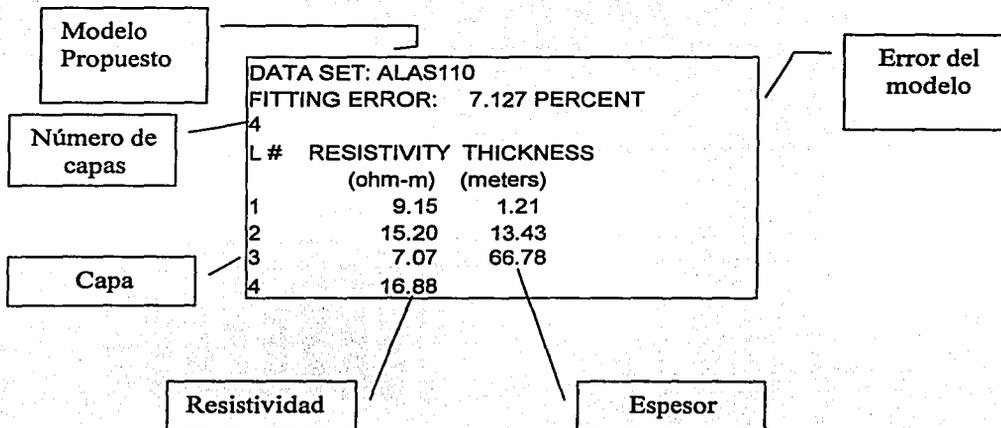
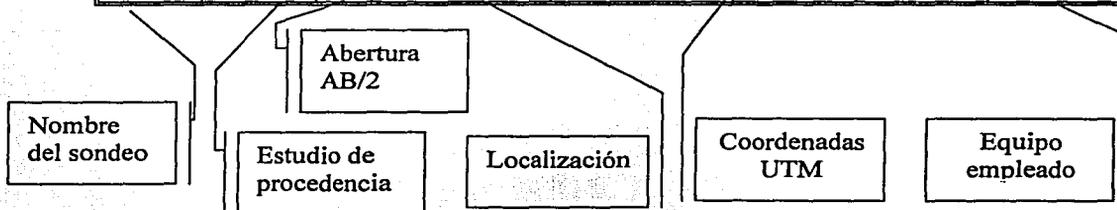


NIV. ESTAT	FECHA	NUM PER
0,00	23/11/1996	296
89,67	14/11/1995	295
88,28	10/11/1994	294
86,71		293

Número de periodo

**EJEMPLO DE INFORMACIÓN EN ANEXO 2.**

SONDEO	ESTUDIO	AB/2	LOCALIZACIÓN	COORDENADAS		GEOLOGÍA GENERAL	EQUIPO
ALAS 110	Estudio Geológico-Geofísico para la zona de Balvanera, El Pueblito y Maravillas, Querétaro	1000	Zona de Tlacote, Querétaro	2277300	348000	Arena, arcilla grava; basalto, aglomerado; material lacustre; tobas y andesita	SCINTREX



DATA SET: ALAS110		
FITTING ERROR: 7.127 PERCENT		
L #	RESISTIVITY (ohm-m)	THICKNESS (meters)
1	9.15	1.21
2	15.20	13.43
3	7.07	66.78
4	16.88	