



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO GEOELÉCTRICO DE LA PARTE  
CENTRAL DEL ACUIFERO ACTOPAN-  
SANTIAGO DE ANAYA, HIDALGO

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO GEOFÍSICO  
PRESENTA:  
RICARDO ALEJANDRO ZAMORA MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. TOMÁS GONZÁLEZ MORÁN



MARZO 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



---

---

*Agradecimientos*

*El presente trabajo se ha realizado con el apoyo de amigos y familiares, agradezco al Dr. Tomas González por su ayuda, a las personas que dejaron huella en mi vida (Papá Adrián), que aunque no se encuentran físicamente, están en mi mente en cada momento.*

*El llegar hasta aquí significo mucho esfuerzo, traspasar barreras, encontrar fortalezas y descubrir que cada piedra en el camino es una enseñanza y una bendición por que me hicieron ser mejor gracias por recordármelo familia Blanco.*

*Doy gracias a mis compañeros del Sistema de Transporte Colectivo, Metro por apoyarme durante mis estudios, en especial a Cristina, Orlando, Alejandra, Ricardo Sandoval, Miguel Sandoval, Gerardo Luevano, Juan Gallegos y Elisa.*

*Compañeros de universidad que estuvieron conmigo en una parte critica de mi vida, como Armando Toxqui, Selene y Alicia gracias por mostrar que la amistad se extiende más haya de un aula.*

*Y a los que han sido cómplices en este camino, le dan alegría y buena compañía David, José Juan y Braulio jaja.*

*Le agradezco a mi familia, por los consejos y cariños que siempre me demuestran a cada momento, los amo son parte importante, a mi niño hermoso Fernando que lo quiero mucho y mi nueva niña Valentina que la quiero mucho, mucho, como quiero a su hermanita, a su mamá, a sus abuelos así como a sus tíos Luís y Alejandro.*

*Abuelita Geno, tía Anita, tía Mari, tío Migue, gracias por contar con ustedes al igual que el resto de la familia.*

*Gracias por recordármelo Paty.*



---

	<b>PAG.</b>
<b>I.- RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>II.- INTRODUCCION</b>	<b>2</b>
<b>II.1.- OBJETIVO</b>	<b>5</b>
<b>III.- DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	
<b>III.1 LOCALIZACION</b>	<b>5</b>
<b>III.2 CLIMA</b>	<b>9</b>
<b>IV.- MARCO GEOLOGICO, FISIOGRAFICO, OROGRAFICO E HIDROGRAFICO</b>	
<b>IV.1 MARCO GEOLOGICO</b>	<b>10</b>
<b>IV.2 ESTRATIGRAFIA</b>	<b>14</b>
<b>IV.3 MARCO FISIOGRAFICO</b>	<b>19</b>
<b>IV.4 MARCO OROGRAFICO</b>	<b>20</b>
<b>IV.5 MARCO HIDROGRAFICO</b>	<b>22</b>
<b>IV.6 EL ACUIFERO</b>	<b>24</b>
<b>IV.7 RECARGAS Y DESCARGAS NATURALES DEL ACUIFERO</b>	<b>24</b>
<b>V.- ANTECEDENTES Y METODOS GEOFISICOS</b>	<b>26</b>
<b>V.1 ECUACIONES GENERALES</b>	<b>27</b>
<b>V.2 ARREGLO SCHLUMBERGER</b>	<b>29</b>
<b>V.3 SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL (SEV)</b>	<b>29</b>



---

	<b>PAG.</b>
<b>VI.- RESULTADOS E INTERPRETACION</b>	<b>30</b>
<b>VI.1 DISPONIBILIDAD DE DATOS</b>	<b>30</b>
<b>VI.2 UNIDADES HIDROLOGICAS</b>	<b>33</b>
<b>VI.3 SECCIONES ELECTRICAS</b>	<b>33</b>
<b>SECCION A-A</b>	<b>34</b>
<b>SECCION B-B</b>	<b>35</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>36</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>39</b>
<b>ANEXO</b>	<b>41</b>



## *I.- RESUMEN*

El presente trabajo es una aplicación a la utilización de los métodos eléctricos en estudios de acuíferos. Esta investigación, se realizó en una región ubicada en las cercanías del poblado de Actopan, en el estado de Hidalgo. La geología de la zona se caracteriza por un basamento de rocas metamórficas precámbricas, en discordancia a una secuencia de gran espesor de rocas sedimentarias, paleozoicas y mesozoicas del Cretácico – Terciario y Cuaternario, que sobreyacen derrames basálticos y tobas volcánicas. El acuífero en explotación se encuentra en una zona de rocas sedimentarias marinas, ígneas extrusivas, escasas rocas intrusivas, así como sedimentarias continentales que en conjunto abarcan del Cretácico Inferior al Reciente.

Para la realización de este estudio se obtuvo información geológica, hidrogeológica, climática de diversas fuentes. (CNA 2004. CRM, 1992. THORSA, 1991). Con la finalidad de estudiar las formaciones acuíferas se analizo y reinterpreto la información geoelectrica en el área Con dos líneas de sondeos eléctricos verticales de arreglo Schlumberger. Los sondeos eléctricos fueron interpretados utilizando el software IPI2WIN, generando en cada caso el modelo de capas correspondientes con diferentes resistividades. Los resultados permiten caracterizar la presencia E-W de una formación de 11-25  $\Omega\text{m}$ . que caracterizan al acuífero, actualmente en explotación. Presenta espesores del orden de 200 m de profundidad, que tienden adelgazarse a medida que nos acercamos a las estribaciones de la Sierra Madre Oriental. Pese a que la zona recibe una recargan de tipo vertical adicional como retorno por riego, el acuífero puede representar una buena alternativa para el abastecimiento, a futuro tanto del municipio de Actopan, como para la ciudad de Pachuca.



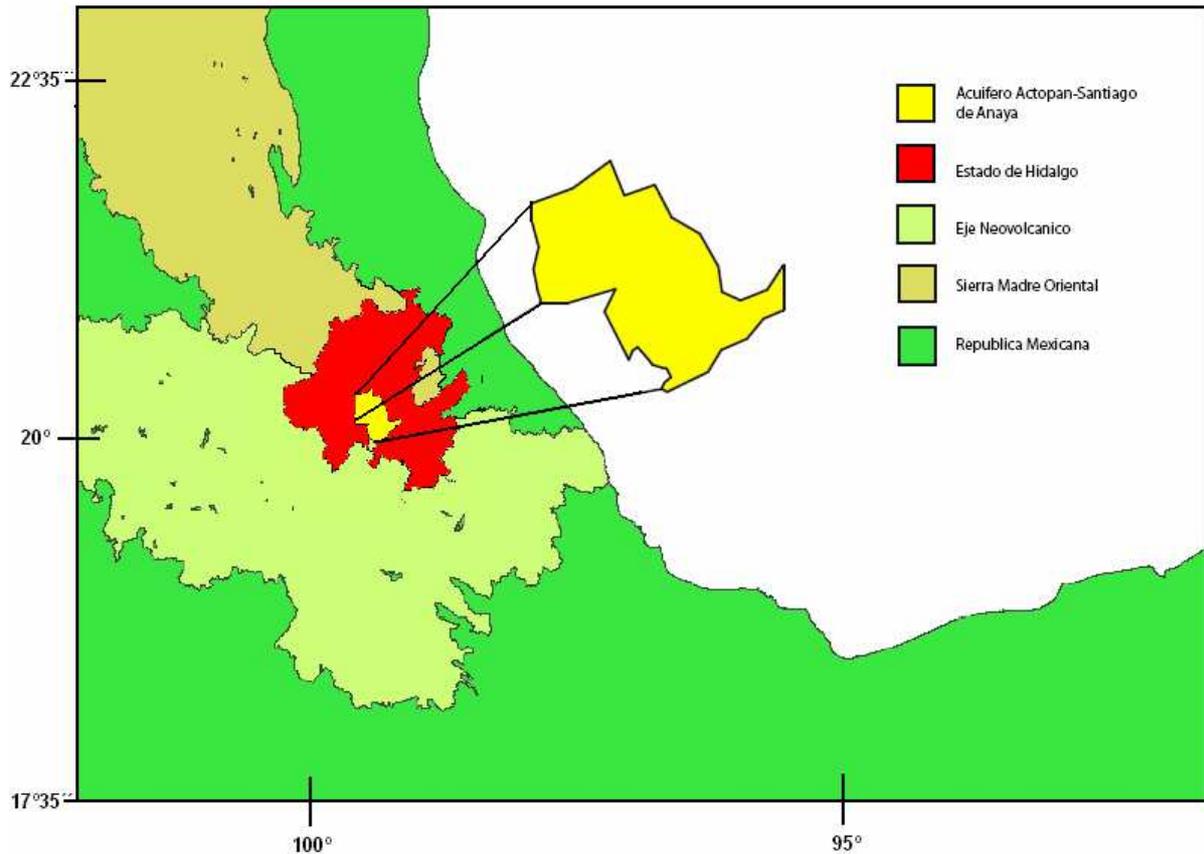
---

## *II.- INTRODUCCION*

Los métodos eléctricos de fuente controlada han sido utilizados como una técnica de prospección en estudios de caracterización de agua subterránea y del subsuelo. El conocimiento previo sobre el comportamiento geológico e hidrogeológico del subsuelo, aunque sea de carácter preliminar, a través de un modelo de tipo conceptual, constituye un elemento fundamental para comprender con mayor precisión los resultados derivados del empleo de métodos geofísicos de exploración. Los contrastes resistivos, nos permiten aplicar exitosamente al terreno los métodos de prospección geoelectrica, mediante la inyección de corrientes continuas.

Los valores de resistividad de las rocas están determinados más que por su composición mineralógica, granulometría, saturación, por la porosidad de la roca y por la salinidad del agua. Todo esto hace que la resistividad de cada tipo de roca, presente una gran variación.

En este trabajo se realiza una aplicación de estos métodos en la investigación y caracterización de las formaciones que constituyen el acuífero Actopan-Santiago de Anaya en el municipio de Actopan, Hidalgo. La geomorfología del lugar ubica la zona de estudio en las provincias fisiográficas denominadas Eje Neovolcánico y Sierra Madre Oriental. La primera, forman amplios valles, dividido por sierras y cerros aislados constituidos por rocas ígneas que varían en edad y la segunda constituida por rocas sedimentarias marinas, en la porción de la Sierra Madre Oriental (Figura 1).



**Figura 1, Localización del acuífero Actopan-Santiago de Anaya,  
(Modificado INEGI, 2000)**

La zona es importante porque es necesario conocer las diferentes formaciones acuíferas dado que para un tiempo relativamente corto, el desarrollo urbano de la capital del estado requerirá del recurso y será necesario contar con fuentes de abastecimientos.

El análisis y la evaluación de los datos eléctricos se realizan a partir de la integración de los sondeos eléctricos en dos líneas las cuales se correlacionan con la información correspondiente al marco geológico. Se interpretaron unidades de material piroclástico y tobas arenosas. Este paquete acuífero presenta espesores van de los 50-200 m. Se observa que esta formación reduce su potencial conforme se aproxima a la Sierra



---

Madre Oriental. Por otra parte, tanto la sierra Madre Oriental y la de Pachuca actúan como barrera orográfica, debido a que los vientos transportan su humedad en las laderas Norte y Este de las mismas; por ello, en el resto de la entidad las lluvias son escasas, sin embargo, el relieve es más suave y permite la utilización de los pocos ríos existentes que corren por ella. El río Actopan es el escurrimiento más importante que cruza la superficie dicho acuífero (CNA, 2004).

Los resultados obtenidos indican la presencia de formaciones acuíferas que en un futuro podrían ser un abastecedor importante, dada la abundancia del recurso y sobre todo la cercanía que tiene con la ciudad de Pachuca



---

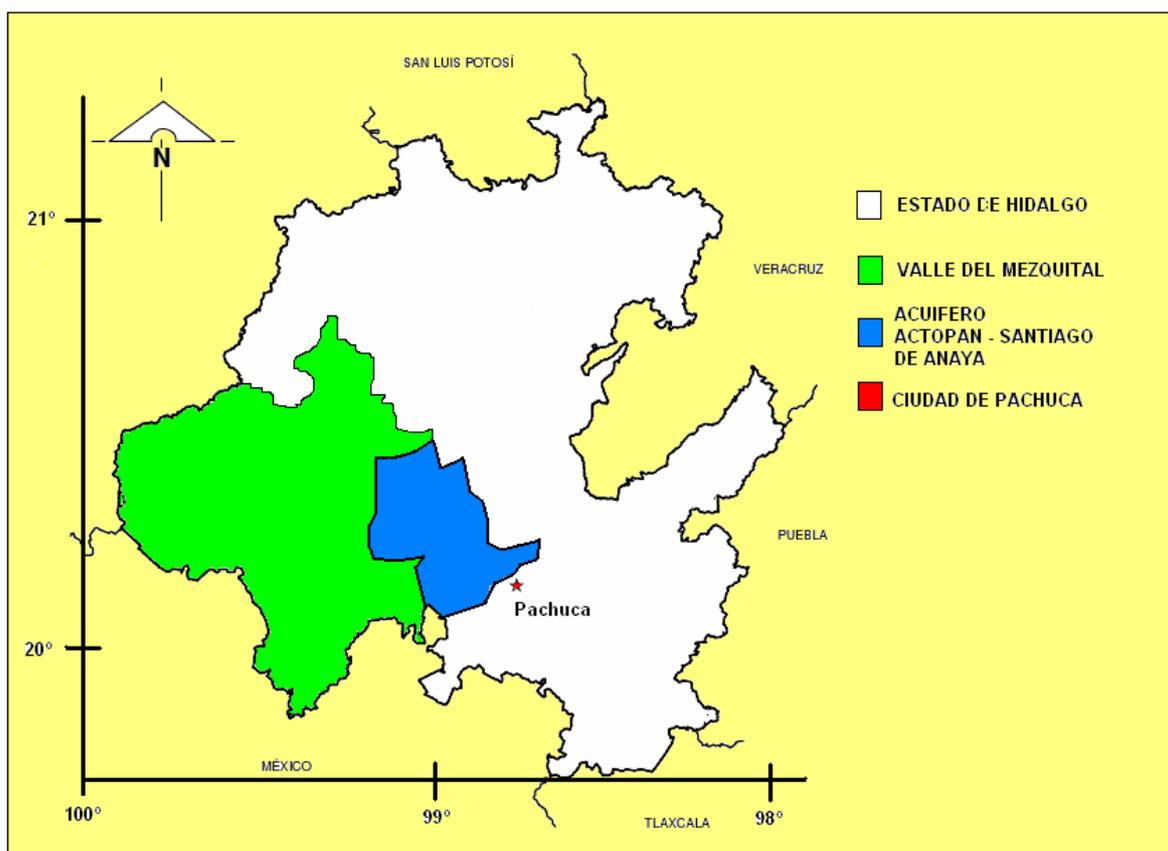
## II.1.- OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es determinar las características litológicas y acuíferas al norte de la población de Actopan y así contribuir en el conocimiento geohidrológico del área de Pachuca específicamente, la zona de Actopan, mediante el análisis e integración de la información geoeléctrica, geológica y mediante generación de modelos geolétricos que favorezcan la comprensión de la distribución, relación y evolución de las unidades geológicas de la región.

## III.- DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO.

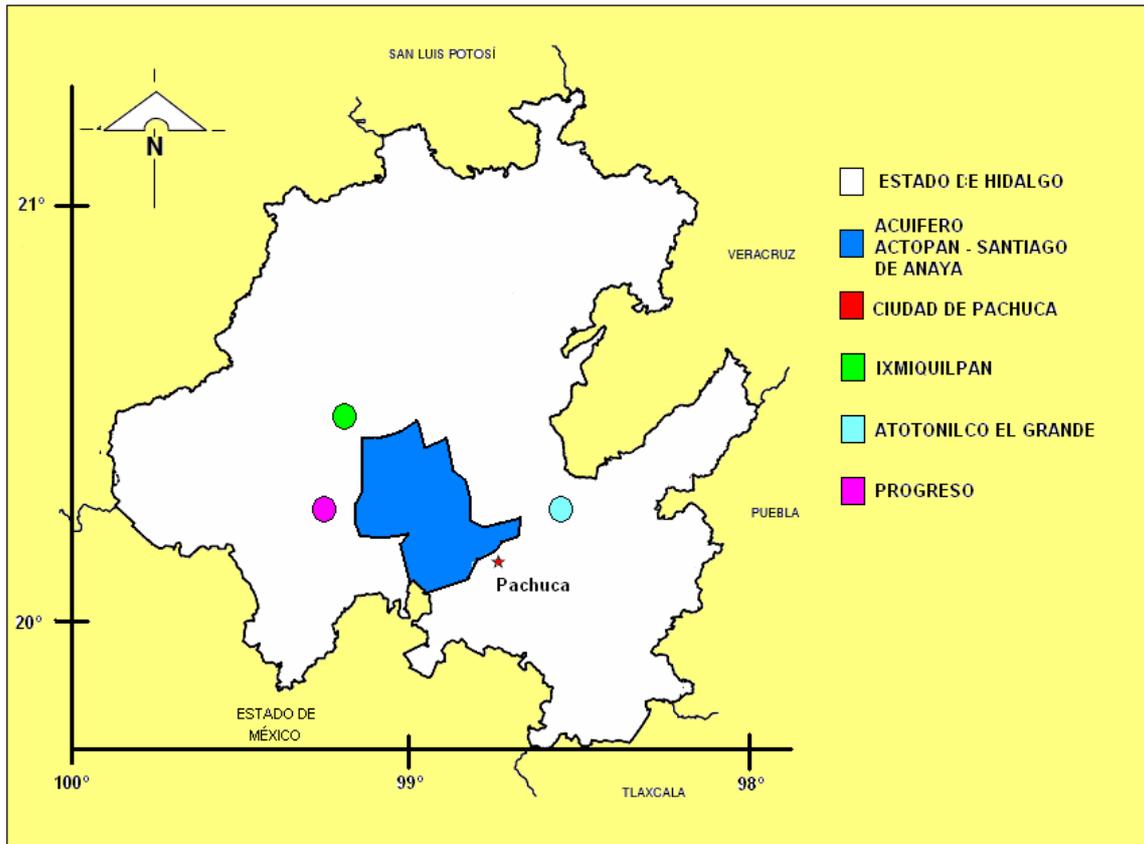
### III.1.- LOCALIZACIÓN.

El área de estudio se localiza en la porción centro-sur del estado de Hidalgo. En la región se encuentra el acuífero denominado Actopan-Santiago de Anaya perteneciente a la cuenca del río Tula Valle del Mezquital (Figura 2).



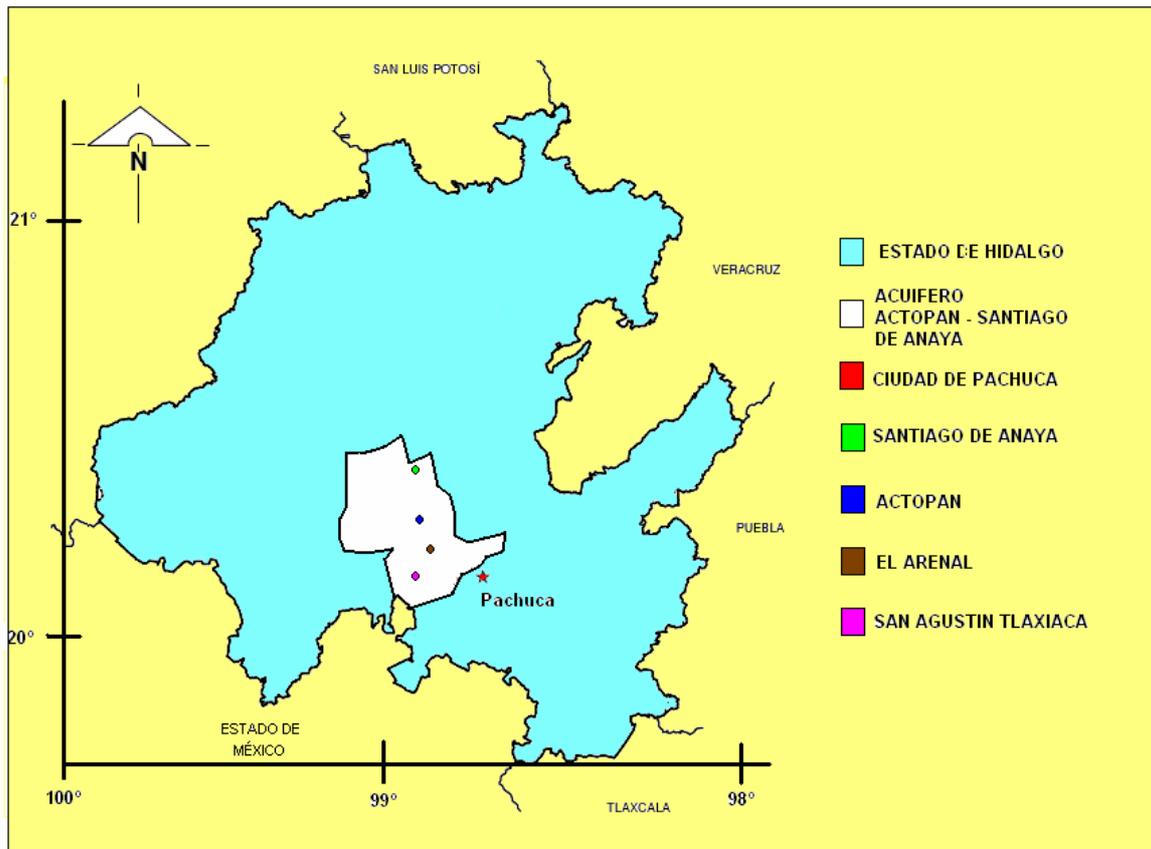
**Figura 2, Ubicación con respecto al Valle del Mezquital.  
(Modificado AEH 2005)**

El acuífero se encuentra limitado al norte con el valle de Ixmiquilpan, al Este con el municipio de Atotonilco el Grande, al Oeste con el municipio de Progreso y al Sur con el Estado de México (Figura 3).



**Figura 3, Municipios colindantes al acuífero Actopan-Santiago de Anaya. (Modificado AEH 2005)**

Contiene a los municipios de San Agustín Tlaxiaca, El Arenal y abarcándolo en su totalidad Actopan y Santiago de Anaya. Estos últimos le dan nombre a este acuífero. La mayor parte del acuífero abastece a los municipios de Actopan y Santiago de Anaya (Figura 4).



**Figura 4, Municipios que abarca el acuífero Actopan-Santiago de Anaya. (Modificado AEH 2005)**

Dentro del acuífero se ubica el Distrito de Riego 03 Tula, el cual se abastece de las aguas residuales provenientes del área metropolitana de la Ciudad de México. El riego con las agua superficiales tiene gran influencia sobre la recarga de dicho acuífero aun con la presencia de contaminantes asociados (CNA, 2004).

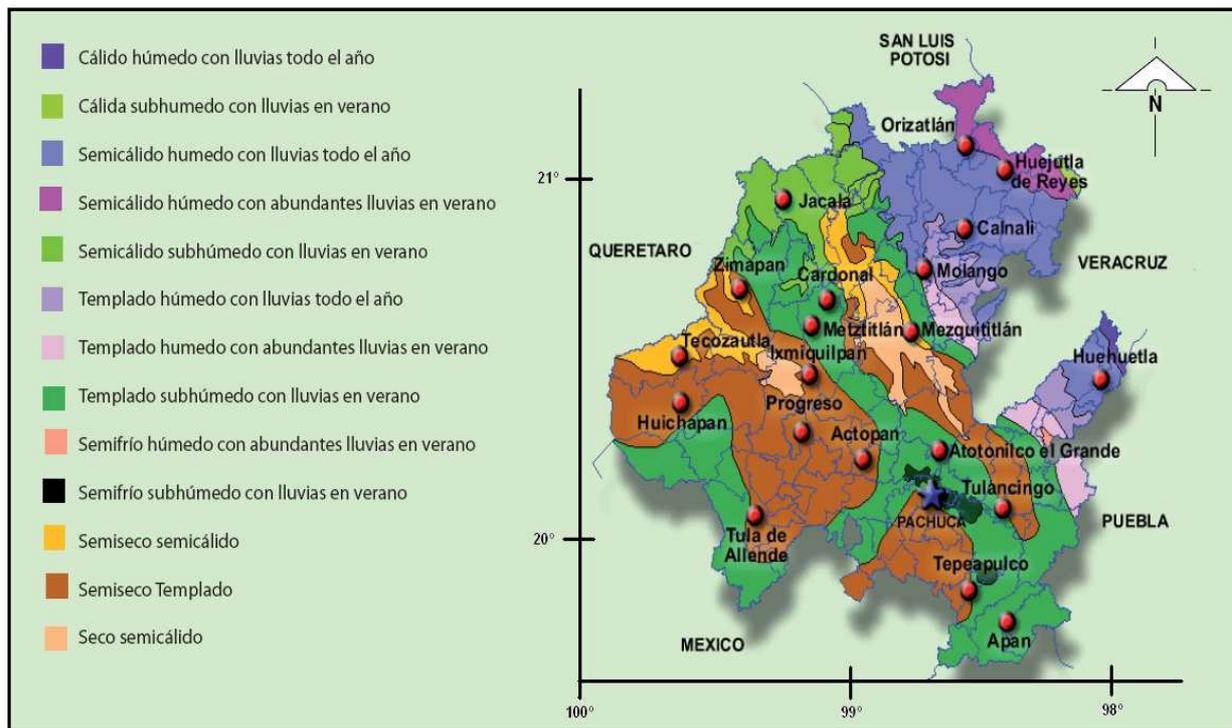


### III.2.- CLIMA.

El clima predominante en el estado de Hidalgo es del tipo templado con una temperatura media anual de 17° C. Debido a que la topografía del estado es muy irregular, existen variaciones climatológicas aún en regiones muy cercanas. La Sierra Madre Oriental desempeña un papel importante en la variación climática, debido a que constituye una barrera a los vientos húmedos provenientes del Golfo de México.

El clima templado se presenta en un 60% de la superficie de la entidad. El clima frío, con una precipitación promedio de 702 mm y una temperatura entre los 13° y 15° C, se observa principalmente en los meses de invierno, y solo en las regiones de Apan, Pachuca, Tulancingo y Tula de Allende. Sin embargo la regiones noroeste de Huichapan, Zacualtipan y Molando tienen un clima semifrío con una precipitación media de 1,102 mm y temperatura de 16° C (IHG, 1993. INAFRED, 2005).

Precipitación promedio de 1,852 mm y una temperatura de 22° C se observa en la región de Huatla (Figura 5) (CNA, 2004. CRM, 1992, INEGI, 2000).



**Figura 5, Variabilidad climática en el Estado de Hidalgo.  
(Modificado de INEGI, 2000)**

#### IV.- MARCO GEOLOGICO, FISIOGRAFICO, OROGRAFICO Y HIDROGRAFICO

##### IV.1.- MARCO GEOLOGICO

En el Estado de Hidalgo se han realizado diversos estudios geológicos. Los más antiguos fueron elaborados por Mullerried (1850) donde mostró algunas características fisiográficas y geológicas. Así mismo durante la exploración petrolera se realizaron estudios por algunas compañías inglesas, en la zona de Chicontepec, Veracruz (N. Jahr, 1884) donde se describen y hacen algunas consideraciones de índole petrolero para esta región (CRM, 1992).

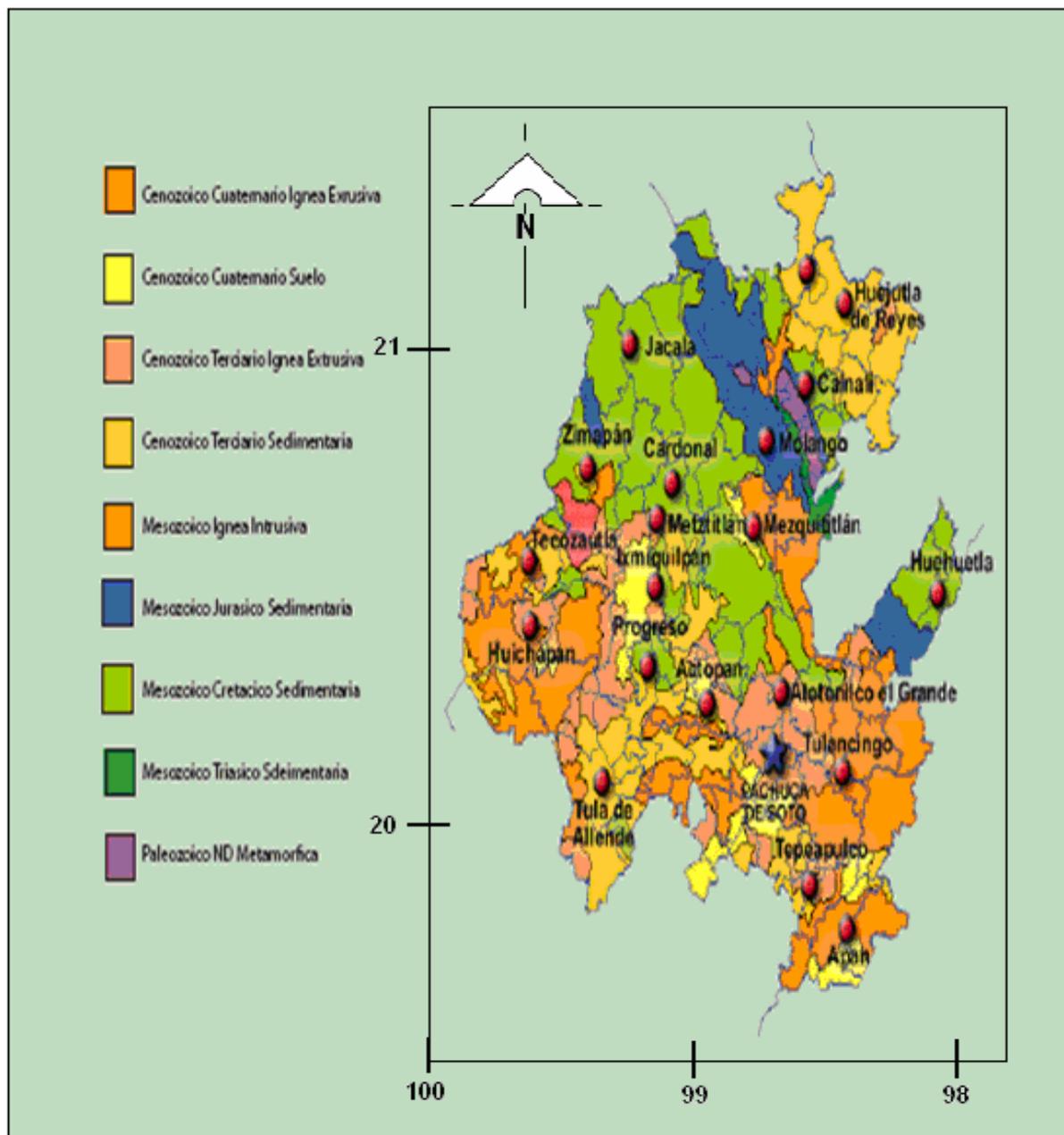


---

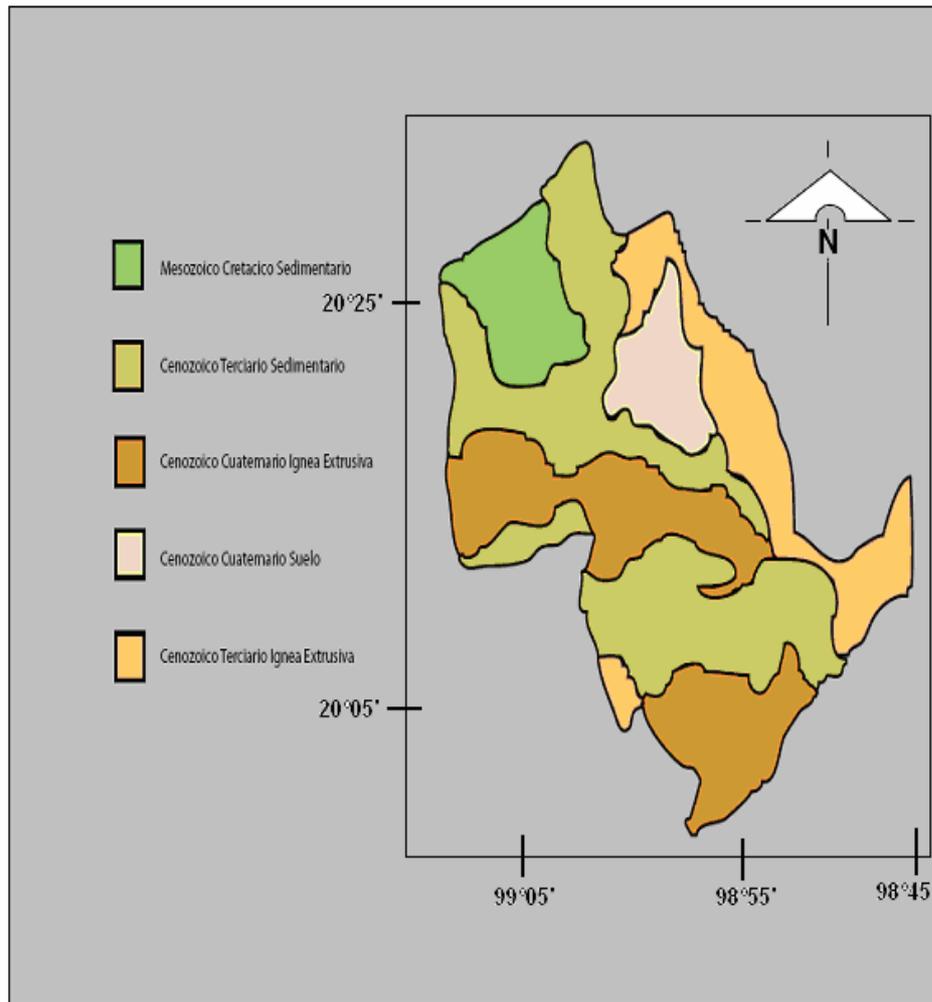
Por un potencial económico, la región mas estudiada en el estado ha sido la de Pachuca-Real del Monte de donde se conocen trabajos desde 1855 (CRM, 1992). Recurrentemente otras instituciones han realizado estudios y mapas de la región. Para elaborar el mapa geológico del Estado, se tomaron como base la cartografía de la Secretaria de la Defensa Nacional, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y del Instituto de Geología, UNAM, e información de regiones estudiadas con mayor detalle por el Consejo de Recursos Minerales (CRM, 1992).

En el Estado de Hidalgo se representa un basamento de rocas metamórficas precámbricas, en discordancia a una potente secuencia de rocas sedimentarias paleozoicas. Rocas sedimentarias mesozoicas del Triásico-Jurásico y Cretácico, sobreyacen, en discordancia angular, a las rocas anteriores cubiertas por rocas cenozoicas, que en su base son marinas, y en su cima presentan rocas volcánicas, de composición andesítica y basáltica (Figura 6) (CNA, 2004).

Con respecto a el acuífero se encuentran rocas sedimentarias del Mesozoico y Cenozoico, al igual que rocas ígneas extrusivas cenozoicas (Figura 7) (CRM, 1992).



**Figura 6, Geología del Estado de Hidalgo (Modificado INEGI, 2000)**



**Figura 7, Clasificación geológica del acuífero en estudio  
(Modificado de INEGI 2000)**



#### IV.2.- ESTRATIGRAFIA.

En el área de estudio, se localizan afloramientos de rocas sedimentarias marinas, ígneas extrusivas, escasas rocas intrusivas, así como sedimentarias continentales que en conjunto abarcan del Cretácico Inferior al Reciente. (CRM, 1995)

Los sedimentos presentan abundantes fragmentos de rocas volcánicas transportadas y alineadas, conforme a la dirección de la corriente, además de areniscas, conglomerados, arcillas y calizas lacustres.

En el Cuaternario tuvieron lugar abanicos aluviales, de composición calcarea ampliamente distribuidos en el área estudiada. Su granulometría varía desde bloques hasta arenas y gravas empacadas en una matriz limosa. Presentan buena permeabilidad, ayudando a la recarga de los acuíferos (Figura 8).

### **DESCRIPCION DE LAS PRINCIPALES FORMACIONES**

#### **Formación El Doctor**

Las rocas del Cretácico Inferior, están representadas por calizas de la Formación El Doctor. Ampliamente distribuidas en el área, se caracterizan por la presencia de oquedades, agujeros de disolución y fracturación la cual les otorga una alta permeabilidad, funcionando como zonas altamente receptoras de carga a la vez que se encuentran buenos acuíferos. El ambiente de depósito es de plataforma abierta. Algunos pozos perforados en esta unidad estratigráfica denotan alta productividad y rendimiento. (Segestrom 1957).



---

Algunos estudios indican que la formación aflora entre Apaxco y Tula en el estado de Hidalgo. Se caracteriza por facies calcáreas, constituidas por calizas mudstone en capas delgadas con nódulos y lentes de pedernal e intercalaciones locales de lutitas (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

### ***Formación Méndez***

Durante el Cretácico Superior, tuvo lugar la formación de sedimentos terrígenos identificados como la Formación Méndez, que descansan sobre la Formación El Doctor. Su constitución arcillosa le confiere una baja permeabilidad, funcionando como confinante superior de los acuíferos de la Formación El Doctor (Segestrom, 1957)

Esta Formación aflora al sur de la sierra del Chichinautzin y al noreste de la cuenca de México.

### ***Grupo El morro***

Durante el Cretácico Inferior y específicamente en el Eoceno se presenta, en forma discordante sobre las formaciones anteriores. Comúnmente de un conglomerado fuertemente cementado, constituidos por fragmentos de calizas y basaltos en una matriz arcillosa (Segestrom, 1957).

La mayor parte de las rocas terciarias posteriores están constituidas por derrames de lava, brechas con composición riolitaca a andesitita.



---

### **Grupo Pachuca**

Las rocas ígneas extrusivas consisten de una secuencia de emisiones piroclásticas, de composición andesítica principalmente, y clasificadas estratigráficamente como Grupo Pachuca, cuya formación corresponde al Oligoceno-Mioceno del Terciario

Grupo constituido por derrames de lava, brechas que van desde composición riolítica, andesítica hasta dacítica, También se observan diques, que en ocasiones presentan mineralización asociada. Cabe resaltar que las principales mineralizaciones se encuentran dentro de este grupo (Geyne, Fries, Segestrom, Black y Wilson, 1963).

### **Grupo Tarango y Zumate**

La formación Tarango es una secuencia comprendida del Plioceno al Cuaternario. Aflora en el área del valle y las laderas bajas de las montañas perimetrales, descansando principalmente sobre sedimentos del Cretácico. Estas rocas consisten de depósitos sedimentarios de origen fluvial, intercaladas con materiales volcánicos.

Estas formaciones se pueden considerar en un conjunto, compuesto por tobas, conglomerados, gravas volcánicas de origen fluvial y capas delgadas de pómez. Presentan entre alta y media permeabilidad y funcionan como rocas transmisoras del agua infiltrada hacia formaciones más profundas. (Schlaepfer, 1968).

Otras formaciones cenozoicas presentes en la región son diferentes a los sedimentos de la Formación Tarango. Encontrándose constituidos por conglomerados, arena y arcillas, fue elaborado por Fries, Jt , 1965, como



---

la Formación Atotonilco el Grande. Presenta espesores de alrededor de 500 m.

La Formación San Cristóbal constituida por un paquete de rocas maficas compuestas por derrames andesiticos y basaltos que afloran en la región de Pachuca – Real del Monte.

***Cuaternario.***

El Cuaternario se encuentra representado por depósitos de talud, abanicos y depósitos aluviales con distintas granulometrías, grados de compactación, sedimentación y algunos derrames basalticos y andesiticos.



**SIMBOLOGÍA CUATERNARIO**

Qal	ALUVIAL
QB	BASALTO

**TERCIARIO SUPERIOR**

TpCg-Ar	CONGLOMERADOS ARENISCAS
TsBv-Da	BRECHA VOLCÁNICA DACÍTICA
TsRd	RIODACITAS
TsAsDa	TOBA ANDESÍTICA DACÍTICA
TsBvA-Da	BRECHA VOLCÁNICA ANDESÍTICA A DACÍTICA
TsA	ANDESITA

**INFERIOR**

TIR	RIOLITA
TICgp	CONGLOMERADO POLIMÍCTICO

**CRETÁCICO SUPERIOR**

KsLu-Ar	LUTITA-ARENISCA
---------	-----------------

**INFERIOR**

KjCz(1)	CALIZA
KjCz(2)	CALIZA

**COLUMNA GEOLÓGICA**

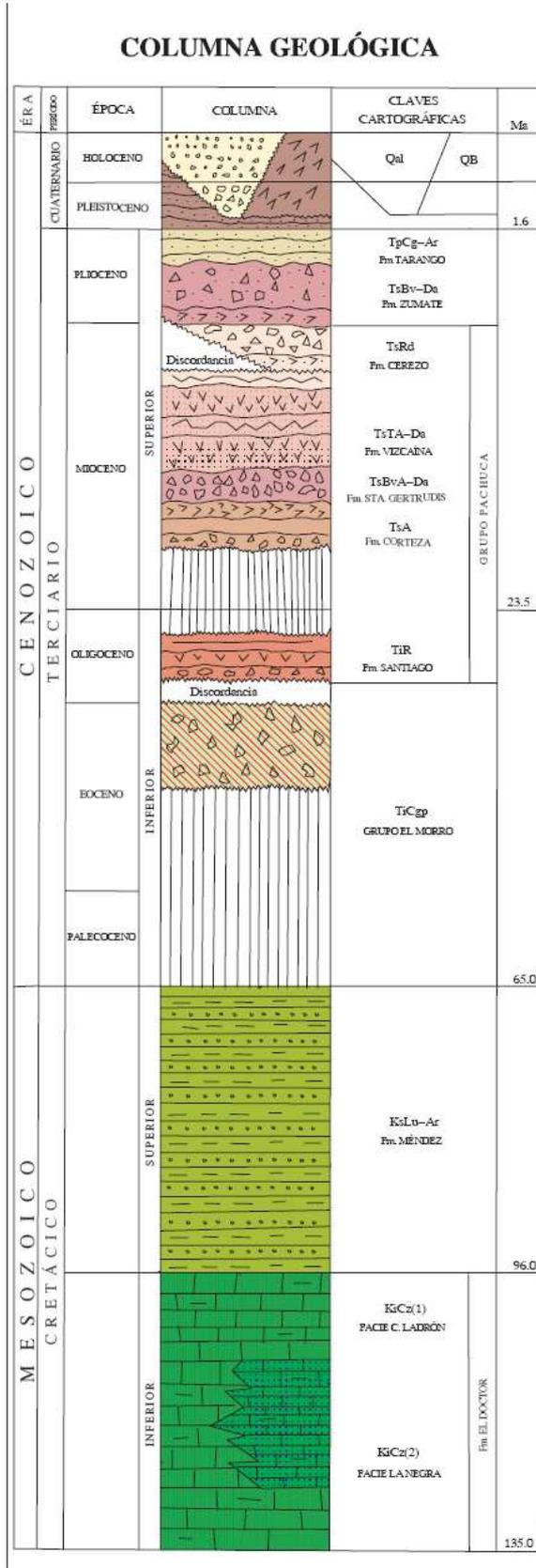


Figura 8, Columna geológica (CRM 1995)



#### IV.3.- MARCO FISIOGRAFICO

La región de estudio esta ubicada en las provincias fisiográficas denominadas Eje Neovolcánico y Sierra Madre Oriental. La primera formando amplios valles dividido por sierras y cerros aislados constituidos por rocas ígneas intrusivas que varían en edad y rocas sedimentarias marinas en la porción de la Sierra Madre Oriental. Se desarrolló sobre estructuras geológicas deformadas del Precámbrico y Paleozoico, que subyacen a rocas Mesozoicas plegadas de diferentes tipos y orientaciones. Su carácter estructural está acentuado por pliegues complejos recostados y grandes fallas, fenómenos asociados estrechamente con la aparición de cuerpos intrusivos de diversa composición (CRM, 1992).

La actividad volcánica se manifiesta durante casi todo el Terciario, formando extensos y gruesos derrames atestiguados por numerosos conos cineríticos, mesetas de flujos piroclásticos y derrames de basalto. Algunas de estas estructuras han sido modificadas por vulcanismo explosivo (CRM, 1992).

Los sedimentos marinos del Terciario, localizados en la porción noreste del Estado. Se relacionan con la formación de la Llanura Costera del Golfo, originada por la regresión del Atlántico desde principios del Terciario y el relleno gradual de la cuenca oceánica, por medio de materiales erosionados, transportados y acumulados sobre el talud de la plataforma continental (CMR, 1992).

Deslizamientos de masas rocosas, debido al fracturamiento, han afectado los pliegues calizos de la Sierra Madre Oriental y las estructuras volcánicas de la Provincia del Eje Neovolcánico. La acción del agua forma importantes extensiones de suelos residuales y estructuras cársticas como dolinas,



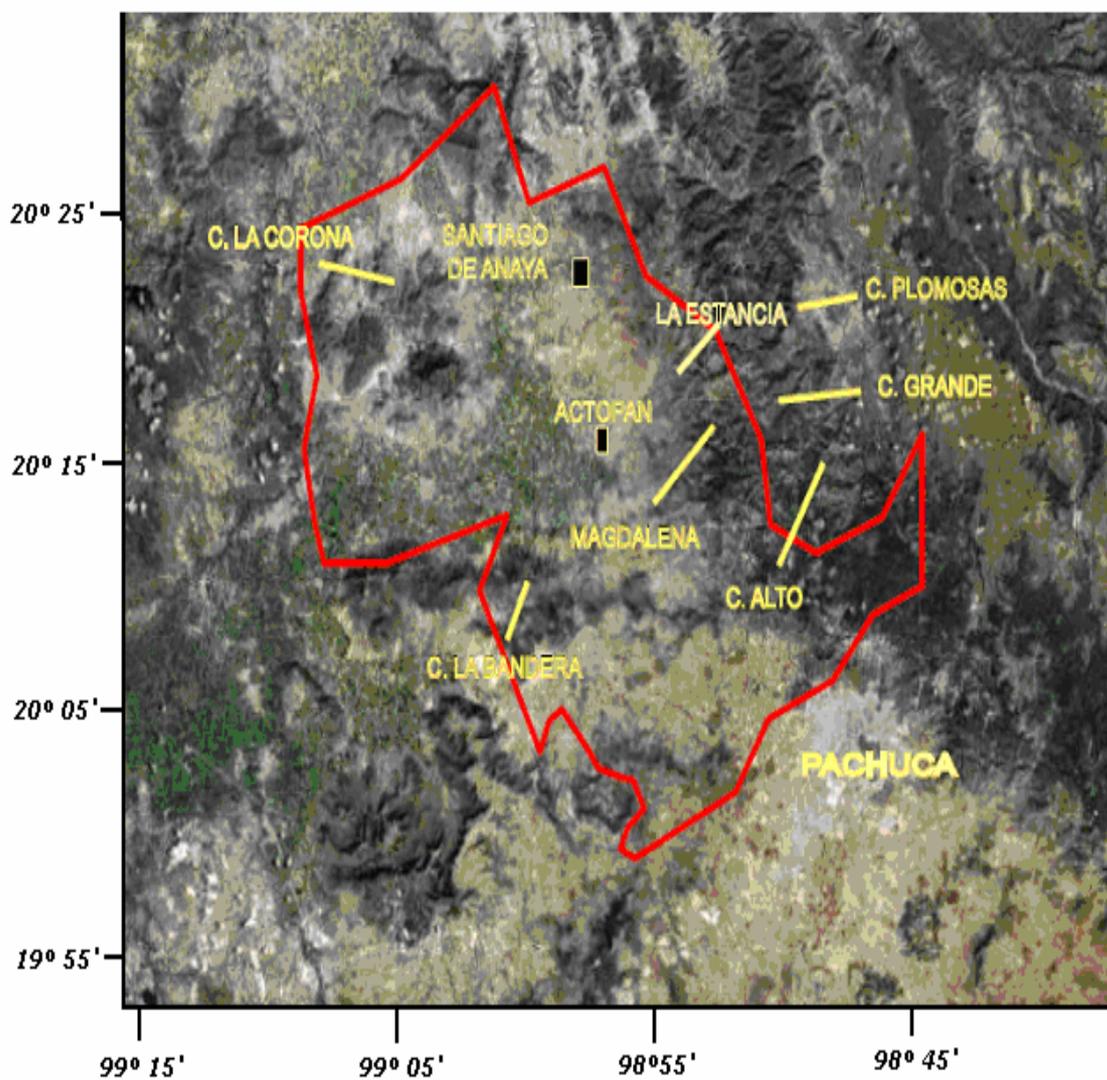
---

cavernas y simas. Asimismo, a profundizado grandes cañones por donde drenan hacia el Golfo de México los ríos principales que cruzan la entidad como el Río Amajac y Río tula (CRM, 1992).

En el área estudiada los rasgos estructurales dominantes son evidencia de diversos eventos geológicos. El primero de carácter compresivo, empezó a fines del Cretácico y terminó a principios del Terciario, como resultado se formo constituida por rocas sedimentarias del Mesozoico, que ha sido arqueada y plegada y cuya característica principal, consiste en los grandes pliegues recumbentes y fallas inversas que afectaron a las formaciones, El Doctor y Mezcala. (CRM, 1992)

#### IV.4.- MARCO OROGRAFICO

Entre las principales elevaciones presentes en el municipio, se encuentran el Cerro Grande con una altitud de 2,620 m.s.n.m. ubicado entre las localidades de La Estancia y Santa María Magdalena; el Cerro Corona, con una elevación de 2,560 metros situado al sureste del municipio; el Cerro La Bandera con 2,520 metros muy próximo al municipio de Santiago de Anaya, el Cerro Plomosas y al Cerro Alto. Cuenta además con gigantescos peñascos, conocidos como los Órganos o Los Frailes (Figura 9). (CNA Gerencia de Agua Subterráneas 2004).



**Figura 9, Orografía de la zona del acuífero Actopan Santiago de Anaya y sus alrededores (Creada por el autor)**

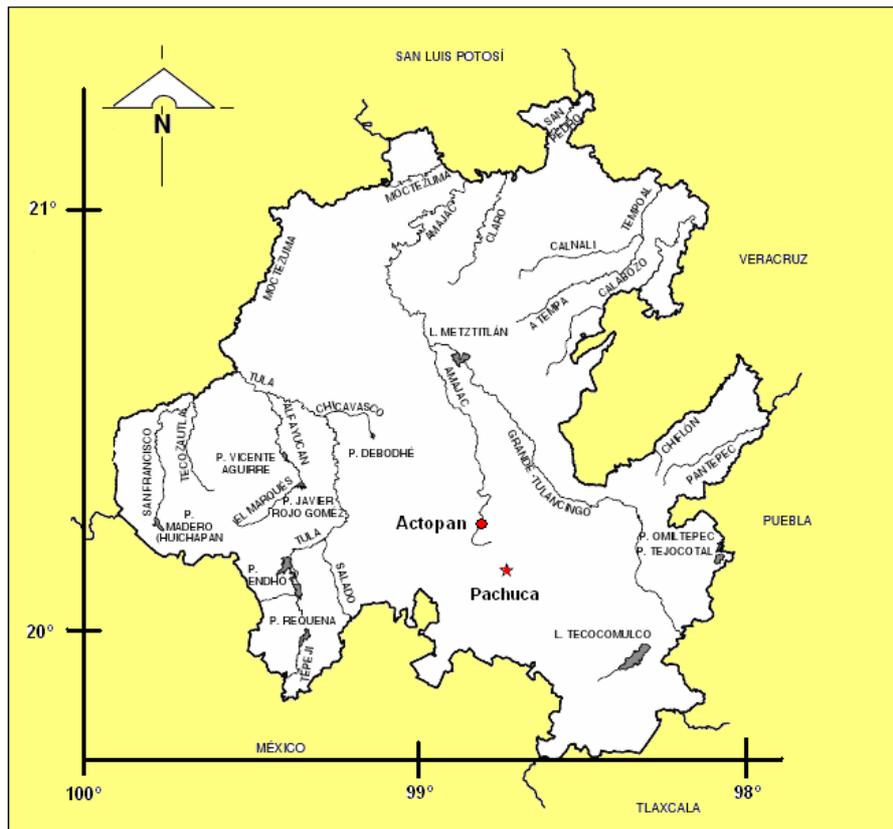


#### IV.5.- MARCO HIDROGRAFICO.

El acuífero en estudio, pertenece a la Región Hidrológica No.26, Parcial, del Alto Pánuco, así como a la Cuenca del río Tula, Subcuenca del río Actopan.

El río Actopan es el escurrimiento más importante que cruza la zona del acuífero en estudio, en longitud y área drenada. Es uno de los tributarios del río Tula con origen en el parteaguas común con las cuencas del río Moctezuma y del río Amajac, al norte de la del estado de Hidalgo; se inicia siguiendo un curso general hacia el poniente, hasta que cambia rumbo hacia el centro del estado, entrando al valle de Actopan, pasa por esta población a partir de la cual vuelve a cambiar de nombre por el río Actopan, tuerce rumbo noroeste para cruzar todo el valle, pasar por Santiago de Anaya y cruza una zona montañosa que divide a los valles de Actopan e Ixmiquilpan y finalmente descarga en el colector general del Valle del Mezquital (Figura 10).

La fuente más importante de agua de riego, para la región esta representada por las aguas residuales provenientes del valle de México las cuales llegan a la zona de estudio por medio de los canales: Principal Heñido, Principal Requena y alto Requena. Las aguas residuales han contaminado los suelos agrícolas, así como también a los materiales someros del subsuelo por la infiltración de excedentes de riego a nivel parcelario y de los canales de conducción y distribución, aunque el subsuelo funciona como un filtro depurador que retiene algunos de los contaminantes presentes en el agua, la contaminación grave ocurre en los primeros 15 a 30 cm. del suelo (CNA, 2004).



**Figura 10.- Principales ríos del Estado de Hidalgo. (Modificado  
AEH 2005)**



#### IV.6.- EL ACUIFERO

En el alargado valle de Tepatepec-Actopan que se desarrolla de poniente a oriente, se distinguen dos acuíferos, uno en los materiales granulares de relleno (Acuífero Actopan-Santiago de Anaya) y otro alojado en las calizas de la Formación El Doctor, que afloran en el cerro San Miguel (Acuífero Tula-Mezquital).

El sistema de acuífero contenido en materiales de relleno incluye un acuífero superior en los materiales superficiales de relleno y un acuífero inferior en estratos más profundos del subsuelo. El primero se encuentra alternadamente con rocas ígneas fracturadas, arenas piroclásticas y tobas de menor permeabilidad que funcionan como semiconfinantes.

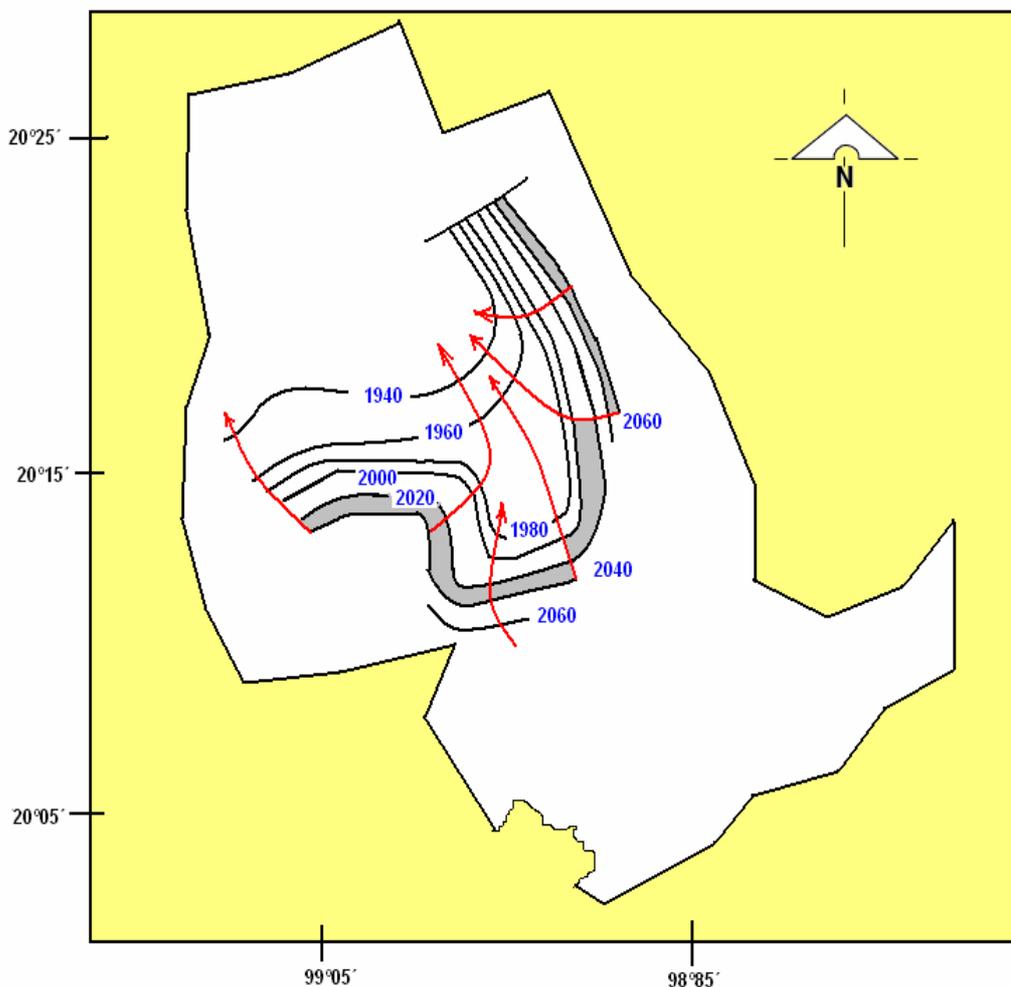
El otro acuífero es artesiano, ya que recibe alimentación inducida de las partes altas del valle Progreso-Tepatepec-Actopan, por infiltración en los canales de riego y excedentes de riego, así como de las estribaciones de la sierra de Actopan, debido a la infiltración natural de aguas pluviales y fluviales. (CNA, Gerencia de Agua Subterráneas 2004)

#### IV.7.- RECARGAS Y DESCARGAS NATURALES DEL ACUIFERO

Al describir las curvas de igual elevación piezométricas fueron identificadas tres zonas de recarga la primera se localiza al sur del poblado Tepatepec por medio de la curva 2040 msnm, la segunda zona de recarga proviene de las partes altas de la cuenca del río Actopan, localizada al sur de Chicavasco y Arenal Señalada por la curva 2040 y la tercera se localiza a lo largo de las estribaciones de la sierra de Pachuca, Señalada por medio de la curva 2060 msnm, (figura 11)

Sin embargo, la recarga principal es la infiltración vertical del agua residual aplicada al riego, tanto a nivel parcelario como a través del sistema de canales de distribución, correspondiendo a una recarga inducida.

Por otra parte, las descargas naturales están representadas por salidas subterráneas horizontales, aportaciones manantiales, manifestaciones de pozos artesanos, y por el flujo base del río Actopan.



**Figura 11, Profundidades de los niveles estáticos en m.  
(Modificado CNA, 1996)**



## V.- ANTECEDENTES Y METODOS GEOFISICOS

Los métodos de prospección eléctrica son una parte de la geofísica, que estudia el comportamiento de la corriente eléctrica cuando ésta es inyectada en el suelo. Pueden dividirse en dos grupos: los métodos de campo natural y los de campo artificial. La diferencia entre ambos radica en que en el primero se utilizan las corrientes naturales existentes en el suelo, con respecto al segundo es necesario inyectar corriente artificialmente en el mismo.

Los métodos de prospección eléctrica son aquellos que aprovechan las propiedades eléctricas del suelo para llevar a cabo estudios sobre las estructuras del interior de la tierra basada en la resistividad eléctrica de los distintos materiales.

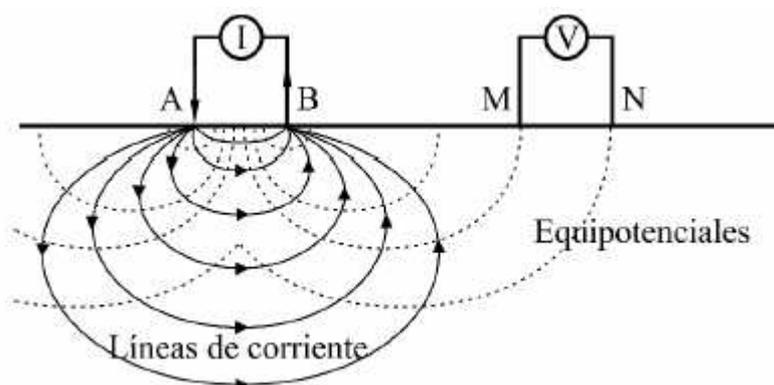
La resistividad es una propiedad inversa a la conductividad eléctrica y generalmente se expresa, ohm por metro ( $\Omega$ -m).

La resistividad de la mayoría de las rocas y sedimentos secos es elevada, por lo que actúan como semiconductores, o conductores de baja capacidad. Este comportamiento cambia significativamente cuando las fisuras o los poros están ocupados por agua, lo que genera una disminución de la resistividad, o lo que es lo mismo, un aumento en la capacidad de conducción de la corriente eléctrica. Además el grado de saturación de agua también incide en la resistividad del medio. El contenido salino del agua; a mayor salinidad, menor resistividad y viceversa. Los contrastes en las resistividades son los que permiten aplicar exitosamente los métodos de prospección geoelectrónica, mediante la inyección de corrientes continuas.

Los valores de resistividad de una roca están determinados por su composición mineralógica, granulometría y saturación de agua, aunque hay que tomar en cuenta la porosidad y salinidad del agua. Todo esto hace que la resistividad de cada tipo de roca, presente una gran variación (Anexo 1 tabla 1).

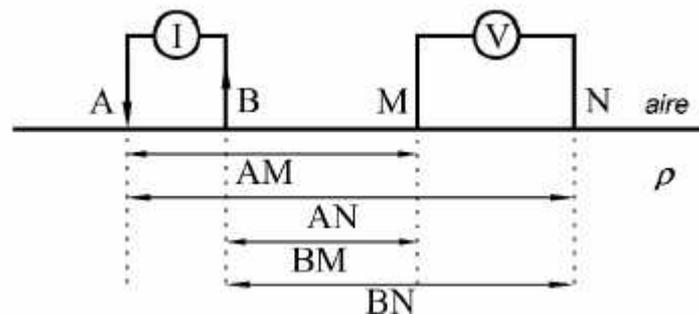
### V.1.- ECUACIONES GENERALES

Mediante el método geoelectrico se busca obtener una imagen del subsuelo en términos de la distribución de resistividades eléctricas. Esta imagen muestra las variaciones de la resistividad de la corteza tanto laterales como en profundidad lo que permite detectar y caracterizar cuerpos o estructuras cuya resistividad difiera de las del medio circundante. Para obtener dicha imagen se emplea una fuente artificial de corriente continua mediante la cual se inyecta corriente de intensidad  $I$  a través de un par de electrodos A y B y se realizan mediciones de la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) en otros dos electrodos M y N -sensores- (Figura 12) cuyas posiciones se eligen convenientemente. Midiendo la intensidad de corriente inyectada en el suelo, la diferencia de potencial y las distancias relativas entre los electrodos, se obtienen los datos de campo a partir de los cuales se calcula la distribución de resistividades subsuperficiales.



**Figura 12, Dispositivo utilizado en la prospección eléctrica.**

Para abordar el problema matemáticamente, en primera instancia se considera un subsuelo compuesto por un semiespacio de resistividad homogéneo. Se dispone de un generador de corriente, el cual se conecta a dos electrodos A y B, colocados en el suelo. La corriente, de intensidad  $I$ , penetra en el subsuelo por A y luego de recorrerlo sale por B. Se mide entonces la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) entre dos puntos M y N a través de otro par de electrodos (Figura 13).



**Figura 13 Disposición de electrodos sobre un suelo de resistividad uniforme  $\rho$**

Para establecer las leyes del fenómeno considerado se parte de las ecuaciones de Maxwell para campos estacionarios y utilizando la ley de Ohm en su expresión vectorial se obtiene la ecuación 1.

$$\Delta V = I\rho \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} \right] \dots\dots\dots (1)$$

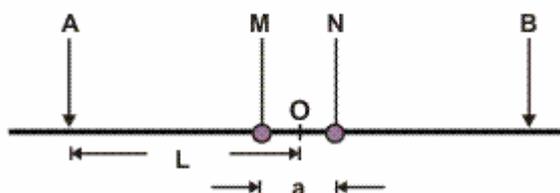
Donde AM representa la distancia entre el electrodo A y el electrodo M, AN la distancia entre el electrodo A y el N y así respectivamente (figura 12). El segundo término de esta ecuación tiene dos factores, uno que incluye la resistividad ( $\rho$ ) y la intensidad de corriente ( $I$ ), y otro que describe la

disposición geométrica de los electrodos, es decir, los parámetros geométricos del sistema.

## V.2.- ARREGLO SCHLUMBERGER

Como se a mencionado un dispositivo de prospección eléctrica consta, en general, de cuatro electrodos, dos de ellos (A y B) por los que la corriente entra y sale y los otros dos (M y N) entre los cuales se mide la diferencia de potencial. Los electrodos A y B se denominan electrodos de corriente y los M y N electrodos de potencial.

Para el estudio se utilizo un arreglo tipo Schlumberger cuya composición simétrica de los electrodos AMNB dispuestos en línea donde los electrodos receptores MN es una distancia mucho menor que la de los electrodos AB (figura 14).

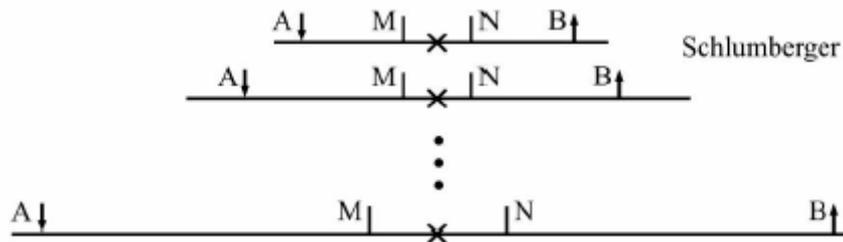


**Figura 14, Dispositivo Schlumberger**

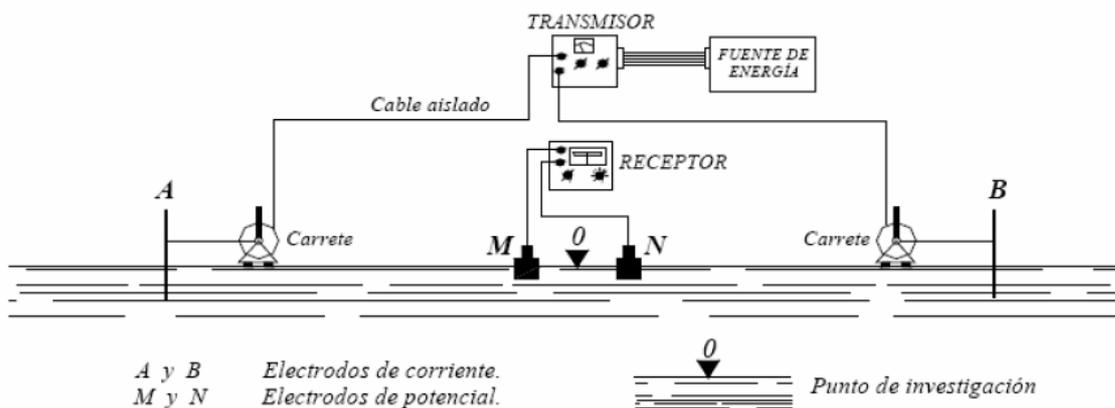
## V.3.- SONDEO ELECTRICO VERTICAL (SEV)

En el SEV se toman mediciones de los valores de resistividad aparente en un punto de sondeo fijo, para distintas profundidades de penetración de la corriente. Esto permite detectar cambios de resistividad vertical en el subsuelo. Así se puede obtener información sobre la profundidad de estructuras. Este tipo de sondeo resulta óptimo para estudiar y

caracterizar capas subsuperficiales horizontales o de inclinación suave que posean diferentes resistividades (figura 15 y 16).



**Figura 15, Sondeo eléctrico vertical, arreglo Schlumberger**



**Figura 16, Arreglo Schulumberger y distribución del equipo geofísico (STC,2004)**

## VI.- RESULTADOS E INTERPRETACION

### VI.1.- DISPONIBILIDAD DE DATOS.

Para la realización del presente trabajo se utilizo y reproceso información geoelectrica disponible, realizada en los últimos años en diversos estudios geofísicos en el área. (THORSA, 1991. CNA, 2004)



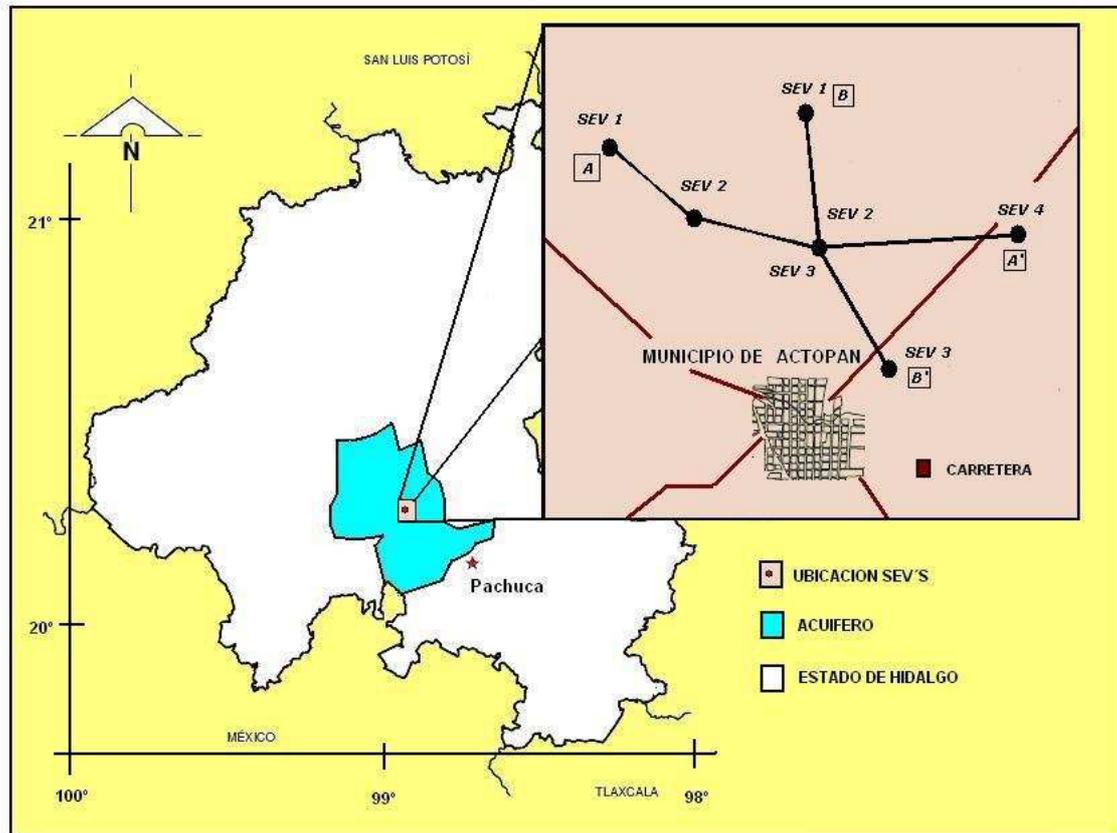
En esta etapa se recopiló la mayor información posible, de tipo geológico, hidrológico, climático y fisiográfico, que se ha hecho en la zona. (CNA, 2004. CRM, 1995. INEGI, 2000) Tal información fue obtenida tanto de estudios hidrológicos preexistentes realizados en el valle, como de estudios geológicos del Instituto de Geofísica de la UNAM y de algunos estudios geoquímicos realizados en el Instituto de Geología de la UNAM. Así como de los realizados por la gerencia de aguas subterráneas de la CONAGUA y del Distrito de Riego 03.

Así también, se utilizó información existente en los boletines hidrométricos y climatológicos complementándose la información más reciente obtenida en la Gerencia de Aguas Superficiales y en la unidad regional ubicada en Actopan.

Con la finalidad de determinar las condiciones litológicas y características acuíferas al norte de la población de Actopan. Del estudio realizado por THORSA, 1991. se seleccionaron y reinterpretaron dos líneas eléctricas con un total de 7 sondeos eléctricos verticales en la modalidad Schlumberger con una abertura promedio máxima  $AB/2$  de 800 m. los sondeos están ubicados en la parte central del acuífero al norte de Actopan. Una de las líneas lo cruza en dirección E-W y el otro N-S (figura 17).

Los sondeos eléctricos fueron analizados e interpretados utilizando el paquete IPI2WIN de Geoscan - M Ltd., Moscú, Rusia. (1990-2000) Este paquete computacional está diseñado para realizar la interpretación automática o semi-automática de datos de sondeos eléctricos verticales arreglo utilizado con más frecuencia en la prospección eléctrica. El algoritmo implementa el filtro de O'Neill (1975), para el cálculo de curvas

de resistividad aparente del dispositivo Schlumberger sobre medios estratificados.



**Figura 17, Ubicación de las Secciones Eléctricas en la zona de estudio (Modificado, AEH 2005).**



---

## VI.2.- UNIDADES HIDROGEOLOGICAS.

A continuación por la información geológica e hidrológica se han podido establecer las características geológicas de la región que se pueden agrupar en 3 unidades que a continuación se describen (Figura 8) (CRM, 1995).

- Un acuífero granular somero, de pocos metros, producto de la erosión de rocas persistentes, que fueron depositadas en las partes bajas.
- Un acuífero en materiales volcánicos, compuesto por intercalaciones de tobas, piroclastos y brechas.
- Un acuífero en formaciones carbonatadas

Considerando la característica granular del Grupo Pachuca estas pueden estar actuando como una forma impermeable que puede presentarse debido a esfuerzos tectónicos en la zona, falla y fractura. De esta manera esta Formación puede permitir recarga en la zona e infiltración lateral al estar en contacto con los paquetes grandes constituyentes de la Formación Atotonilco el Grande.

## VI.3.- SECCIONES ELECTRICAS

A continuación se discuten los resultados de los modelos analizados usando el paquete IPI2WIN. Se constituyen dos secciones geoelectricas (Anexo 1 figuras A1 y A2).



## SECCION A-A'.

Esta sección ubicada al norte de la población de Actopan (Anexo 1 figura A1) está compuesta por cuatro Sev's separados en un intervalo de un kilómetro (figura 17). Se observa una potente unidad de alrededor de 200 m de espesor que alcanza un máximo espesor al poniente asociada a tobas y materiales piroclásticos cuya resistividad varia entre los 11-25 ohm, y cuyo espesor presenta entre 120-210 m. Esta unidad es importante, ya que es donde se encuentra el acuífero en explotación.

Localmente la sección, presenta en el Sev 1 una formación de 5 ohm-m en a una profundidad de 30 m. que puede asociarse a materiales con mayor contenido arcilloso y que contiene agua mineralizada. A medida que el perfil se acerca hacia las estribaciones montañosas al este (el cerro Alto y el Grande) (Figura 6), se observa un incremento en el carácter resistivo de la sección especialmente en los primeros 80 m. (Sev's 3 y 4). Posteriormente a mayor profundidad el carácter resistivo se mantiene pero en menor proporción.

Superficialmente, resalta en los primeros metros coladas de roca ígnea, e intemperizaciones mezcladas con tobas volcánicas, e incluso una intrusión detectada en el SEV 3, producto de la actividad geológica reciente de la región (Anexo 1 figura A1).

A partir de los datos de resistividad, se obtuvieron los mapas de iso-resistividad para diferentes aperturas de  $AB/2$ . En el anexo se presentan las secciones de iso-resistividad aparente para las dos secciones de sondeos. La sección de iso-resistividad obtenida (Anexo 1 figura A3) muestra que para distancias cortas de  $AB/2$  se presenta una zona resistiva en los Sev's 3 y 4. Este carácter resistivo se observa a medida que nos



acercamos a las estribaciones del cerro Alto y el Grande, al este de la zona de estudio, efecto que se mantiene a medida que se incrementa nuestra profundidad de investigación. Sin embargo en el Sev 1 para una apertura de AB/2 de hasta 100 m., se presentan valores de resistividad entre 10 y 17 ohm-m, que pueden ser asociado a la formación Pachuca constituida de tobas y materiales piroclasticos constituyentes de la formación acuífera. Esta tendencia, se alarga en dirección este incrementando suavemente su carácter resistivo, tal y como se observa en la sección a la altura del Sev 3

#### SECCION B-B´.

Esta sección N-S consta de tres SEV´S, que en su parte central se intercepta con la sección A-A´.

Al igual que la sección anterior, se distingue un nuevo paquete identificado como una unidad constituida por piroclastos, tobas arenosas y afloramientos de material limo-arcilloso entre los 90 y 250 m de espesor y cuyo mayor espesor se identifica en el SEV 3. Este paquete presenta variaciones de resistividad (14 - 17 ohm-m), seguramente por la existencia de rocas volcánicas fracturadas (Anexo 1 figura A2).

El los sondeos hechos, respecto al sondeo 1 se presentan resistividades de 60  $\Omega$ -m a unos 800 m. un contraste resistivo (136  $\Omega$ -m) que pudiera ser asociado a basaltos del Grupo Pachuca.

Por otra parte, en la parte superior de la sección entre los primeros 20 m. se distinguen varias unidades constituidas por derrames volcánicos producto de la actividad volcánica perteneciente al Grupo Pachuca. También se observa una capa de baja resistividad (8  $\Omega$ -m) que puede ser correlacionado con material arcilloso (Anexo 1 figura A2).



Al igual que en el análisis anterior, en la sección de iso-resistividad aparente A-A', para distancias cortas de AB/2, existen valores de alta resistividad, eso permite inferir la presencia de una capa resistiva superficial, asociada a materiales basálticos, pertenecientes al grupo Pachuca (Anexo 1 figura A4). En el Sev 2 (parte central de la sección), se encuentran los valores más resistivos, observándose un adelgazamiento de esta capa resistiva, decreciendo los valores resistivos en dirección sur, donde aumenta su potencial el sistema acuífero, que presenta resistividades en el rango de 14 a 19 ohm-m. En la parte norte, la zona de interés se encuentra entre los 25 y 100 m de AB/2, de profundidad de investigación. En la parte central se reduce lateralmente esta formación. Se infiere que entre los 20 y 100 m de AB/2, se tiene la presencia de tobas y materiales piroclásticos asociados al acuífero en explotación. Cuando la apertura de AB/2 es mayor de 100 m., se observa un incremento gradual de los valores iso-resistivos.

## CONCLUSIONES

Los resultados del análisis e interpretación realizados indican que:

En el área se encuentran estructuras geológicas de grandes espesores que caracterizan una región, con buen potencial acuífero. Esta información será de utilidad para lograr un mejor entendimiento de las aguas subterráneas de la región.

Las rocas que constituyen el acuífero Actopan-Santiago de Anaya son principalmente de tipo volcánico, asociadas a la Formación San Cristóbal y Atotonilco el Grande. Conforman el acuífero en explotación, presentando espesores mayores de 200 m. Este es un buen indicador de la permeabilidad de los materiales presentes. La recarga principal proviene



de la zona sur poniente donde aflora la Formación San Cristóbal.

El carácter resistivo tiende a incrementar conforme se acercan los sondeos, al pie de las elevaciones montañosas, principalmente por la presencia de derrames basálticos.

En el aspecto hidrogeológico, la formación Pachuca puede proporcionar recarga e infiltración en el acuífero. Se infiere la presencia de formaciones permeables asociado a la Formación Grupo Pachuca y a La Formación Atotonilco, el Grande, esta última constituida por formaciones granulares, aunque también incluye basaltos en el oriente de Actopan. Las formaciones San Cristóbal y Tarango, pueden presentar un potencial bajo a alto de retención de agua.

La zona es atractiva como reservorio para futuro abastecimiento de la población. Aun cuando el acuífero recibe descargas, se puede considerar al acuífero como futuro y potencial abastecedor de la ciudad de Pachuca siempre y cuando no se afecte a las regiones de Actopan y Santiago de Anaya, debido a sus planes de desarrollo. Hay que reconocer que aunque el subsuelo puede ser un paliativo para el proceso contaminante si será necesario que las descargas puedan recibir algún tipo de tratamiento previo.

## RECOMENDACIONES

Realizar más estudios en la zona para caracterizar el acuífero a mayor profundidad. Con la finalidad de conservar la calidad del agua del acuífero será necesario a futuro controlar la calidad del agua residual que pueda incorporarse al acuífero y que provenga de la infiltración por excedentes



---

de agua de riego y la de los canales de distribución del Distrito de Riego 03.

El abastecimiento de agua de esta región a la ciudad de Pachuca en un futuro cercano no será fácil, pues intervienen intereses de desarrollo y en consecuencia de requerimientos de agua en los municipios aledaños al acuífero. Por ello será necesario estudiar el desarrollo propio de la zona.

Evitar fugas en los sistemas de distribución y en la toma domiciliaria, así como evitar los dispendios por parte de los usuarios. Con la finalidad de garantizar el abastecimiento de agua a la ciudad de Hidalgo, se podrá promulgar el uso de ese acuífero como reserva para la ciudad de Pachuca.



## BIBLIOGRAFIA

- *AEH (2000) Anuario Estadístico Hidalgo Monografía del Estado de Hidalgo, Instituto Hidalguense de la Cultura, tomo I.*
- *CEDUMEN (1998), Centro Nacional de Desarrollo Municipal, información para el desarrollo, Los municipios de México.*
- *CNA (2004) Comisión Nacional del Agua. Impacto por la explotación del agua subterránea en el acuífero Actopan-Santiago de Anaya*
- *CRM (1992) Monografía Geológico-Minera del Estado de Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales.*
- *Fries, Jr, (1965) Nuevas aportaciones Geocronologicas y Tectonicas empleadas en el laboratorio de geocronometria. Bol. Del Instituto de Geología, UNAM, No. 73.*
- *Geyne, Fries, Segestrom, Black y Wilson, (1963). Geología y yacimientos minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, Edo. De México, Cons. Rec. Nat. No Renov., Pub 5E 14,217 pp.*
- *IHG (1993), Instituto Hidalguense de la Cultura, Monografía del Estado de Hidalgo, Instituto Hidalguense de la Cultura, tomo I.*
- *INAFED (2005) Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Enciclopedia de los estados de México.*
- *INEGI (2000) Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Anuario Estadístico*
- *IPI2WIN Alexei A. Bobachev, Igor. N. Modin, Vladimir A. Shevnin, 1990-2000*
- *Miguel Auge (2008) Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea.*
- *Mullened K.G (1850), ) Monografía Geológico-Minera del Estado de Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales*
- *N.johr (1884), ) Monografía Geológico-Minera del Estado de Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales*
- *Orellana, y Mooney. (1966), Tablas y curvas para sondeos eléctricos verticales.*



- 
- O'Neill, D.J. (1975) "Improved linear filter coefficients for application in aparent resistivity computations". Bull. Australian Soc. Explor. Geoph. Vol 6 Num 4.
  - SCT (2010) *Secretaria de Comunicaciones y Transporte Mapa carretero del estado de Hidalgo*
  - Segestrom, (1957) Geología a lo largo de la carretera México D.F. Pachuca, Zimapan. Distritos mineros de Pachuca-Real del Monte y Zimapan. Excursión A-3 y G-1 XX Congreso Geológico Internacional, México.
  - THORSA, *Ingenieros consultores y constructores (1991)* Estudio de actualización hidrológica para el de valle Tula-Mezquital-Actopan, Estado de Hidalgo.
  - Vázquez-Sánchez E y R. Jaimes-Palomera, (1989) Geología de la cuenca de México numero especial sobre el sistema acuífero de la cuenca de México. Geofísica Internacional 28 (2).



---

**ANEXO 1**  
**SECCIONES ELECTRICAS VERTICALES**  
**SEV's**



## SECCION A-A'

### SEV 1

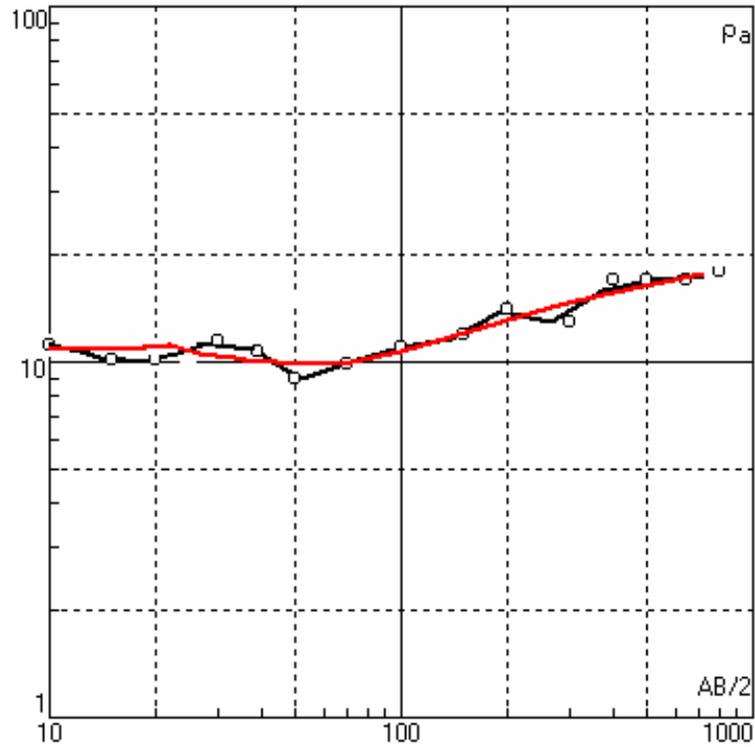
AB/2 (mts)	$\rho$ (ohm-m)
10	11.5
15	10.1
20	10.1
30	11.5
40	10.5
50	9
70	9.9
100	11
150	12
200	14
300	13
400	17
500	17
650	17
800	18

No. Capas	$\rho$	h	d
1	11	25.3	25.3
2	4.84	12.8	38.1
3	15.4	161	199
4	20.3		

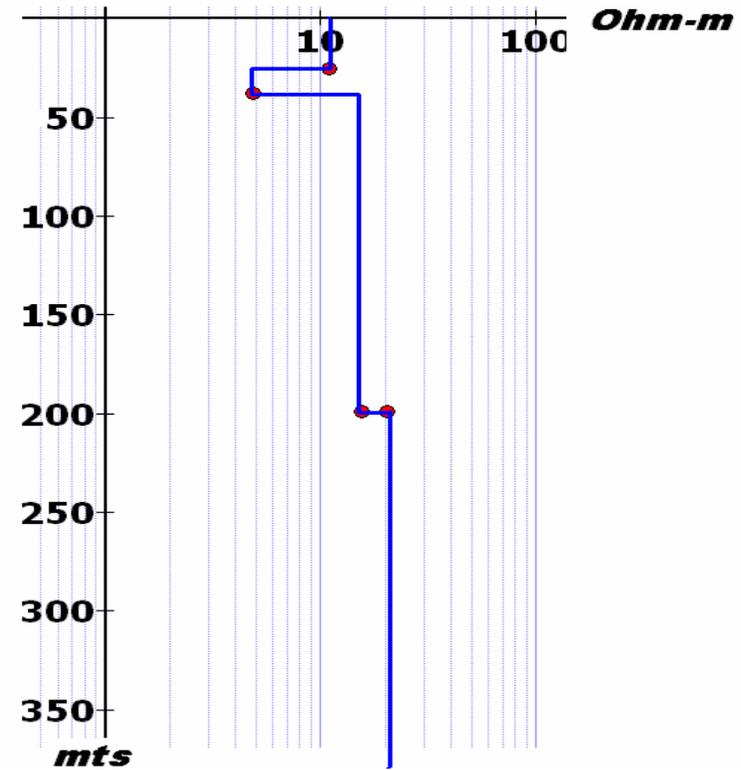
Error de ajuste entre las curvas teórica y práctica 5.67%



### DATOS PROCESADOS



### PROFUNDIDAD DE CAPAS



— CURVA TEORICA      —○— CURVA MEDIDA EN CAMPO



## SECCION A-A´

### SEV 2

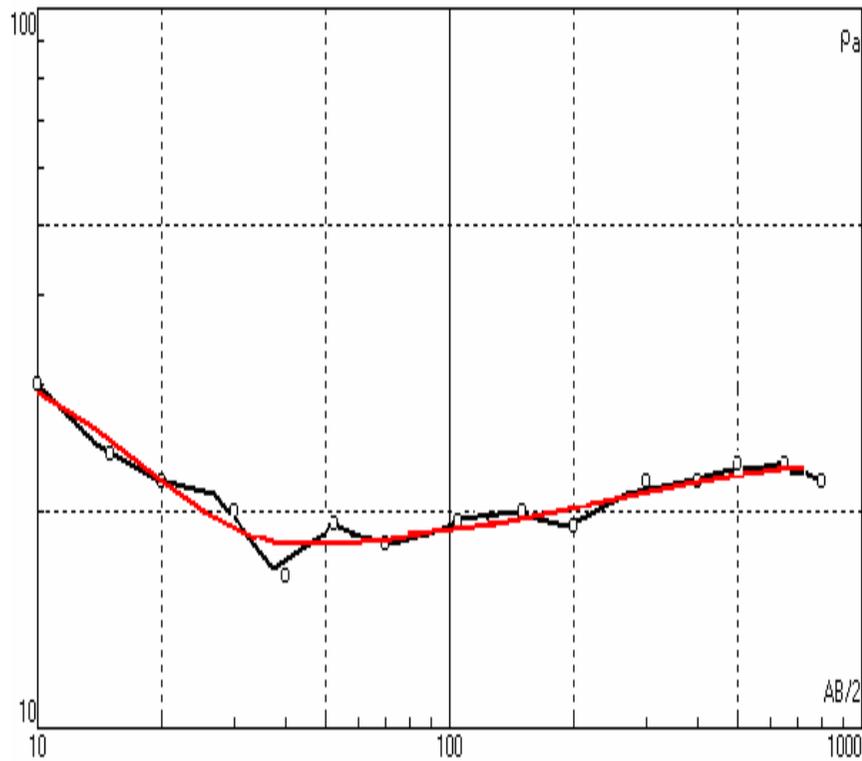
AB/2 (mts)	$\rho$ (ohm-m)
10	30
15	24
20	22
30	20
40	16.2
50	18.9
70	18
100	19
150	20
200	19
300	22
400	22
500	23
650	23
800	22

No. Capas	$\rho$	h	d
1	33	6.97	6.97
2	15.6	17.4	24.4
3	19.3	93.9	118
4	23.9		

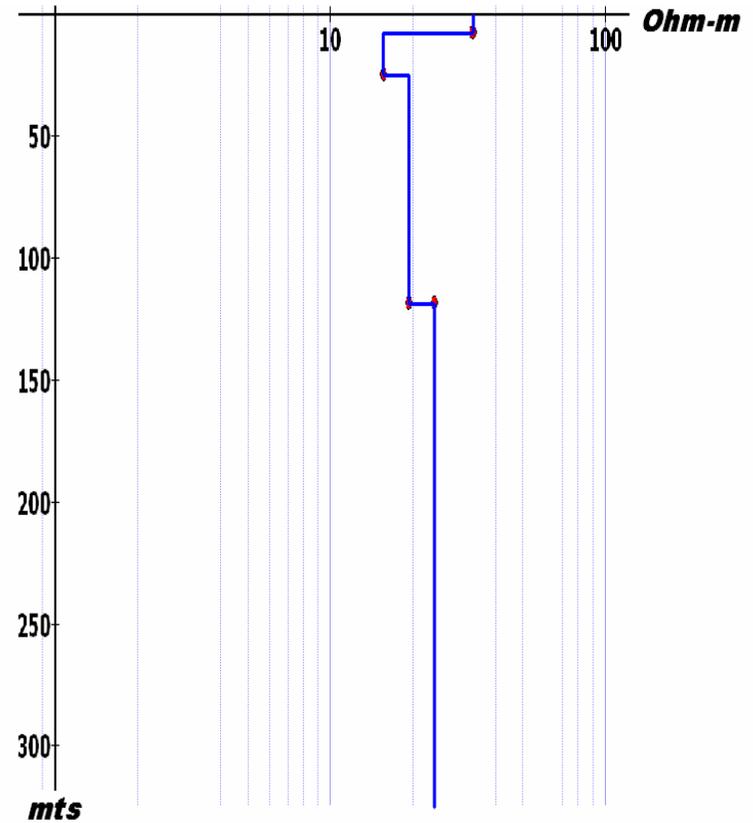
Error de ajuste entre las curvas teórica y práctica 4.19%



### DATOS PROCESADOS



### PROFUNDIDAD DE CAPAS



— CURVA TEORICA    —○— CURVA MEDIDA EN CAMPO



## SECCION A-A´

### SEV 3

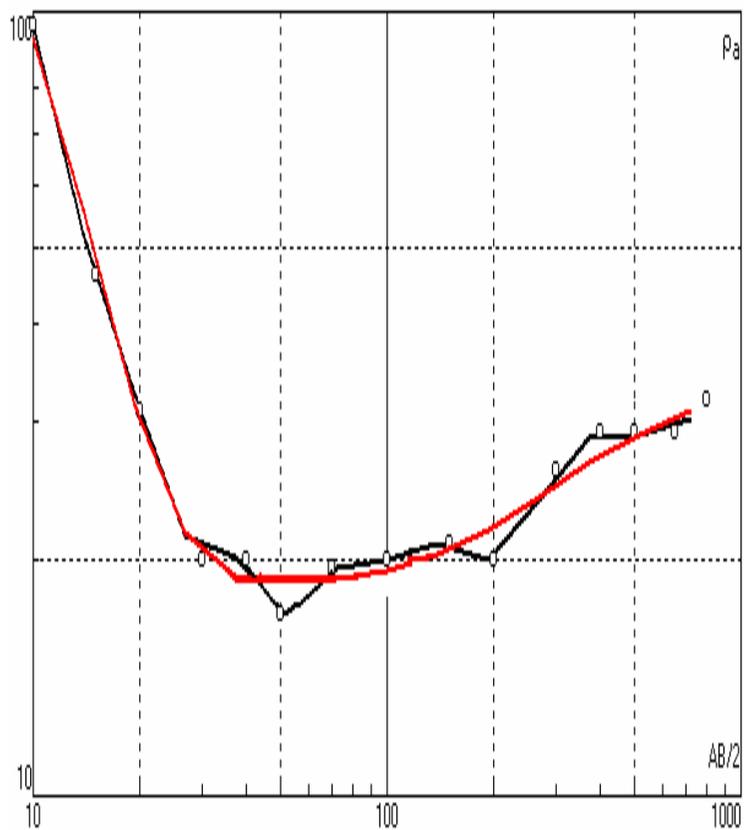
AB/2 (mts)	$\rho$ (ohm-m)
10	96
15	46.1
20	31
30	20
40	20
50	17
70	19.5
100	20
150	21
200	20
300	26
400	29
500	29
650	29
800	32

No. Capas	$\rho$	h	d
1	180	5	5
2	17.2	17.3	22.3
3	18.9	99.5	122
4	35		

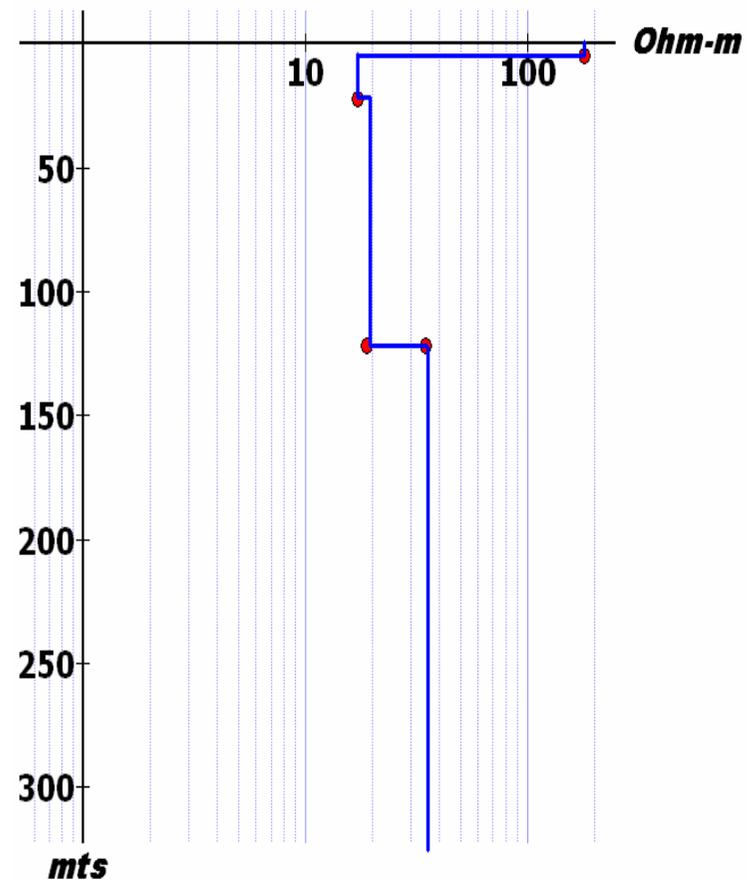
Error de ajuste entre las curvas teórica y práctica 5.04%



### DATOS PROCESADOS



### PROFUNDIDAD DE CAPAS



— CURVA TEORICA    —○— CURVA MEDIDA EN CAMPO



## SECCION A-A´

### SEV 4

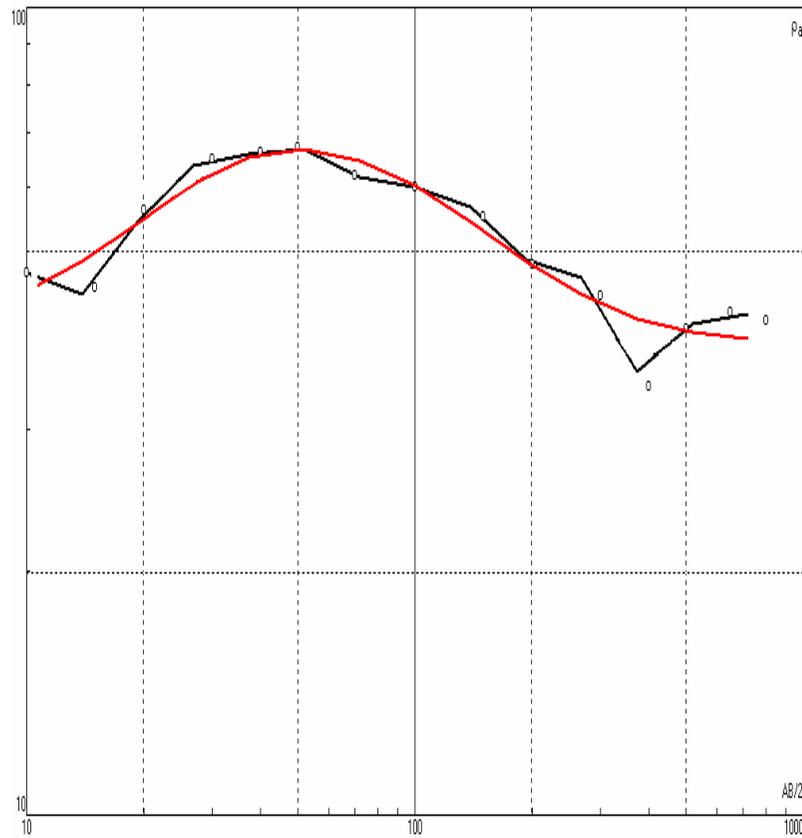
AB/2 (mts)	$\rho$ (ohm-m)
10	47
15	45
20	56
30	65
40	66
50	67
70	62
100	60
150	55
200	48
300	44
400	34
500	40
650	42
800	41

No. Capas	$\rho$	h	d
1	41.1	10.4	10.4
2	161	6.43	16.8
3	59.3	52.9	69.7
4	38.2		

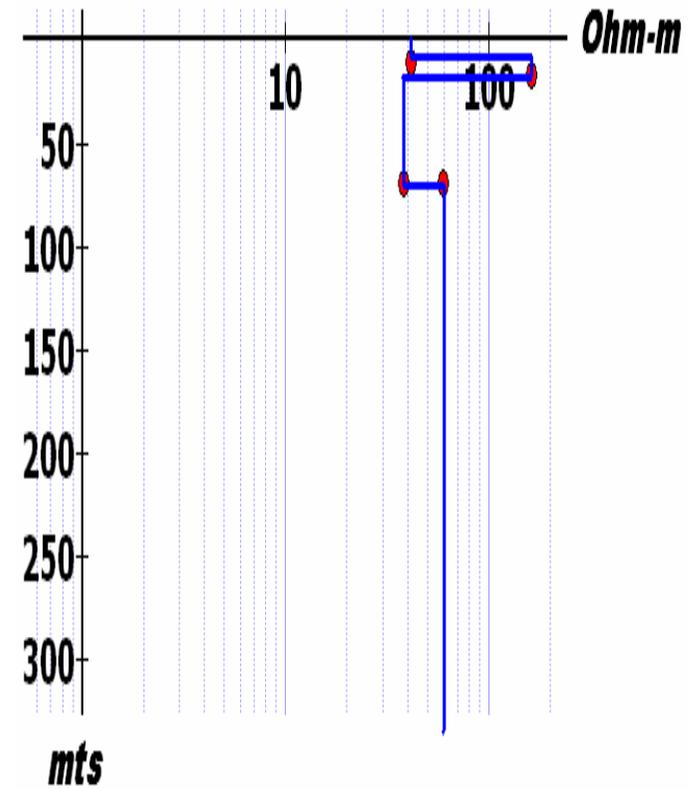
Error de ajuste entre las curvas teórica y práctica 5.91%



### DATOS PROCESADOS



### PROFUNDIDAD DE CAPAS



— CURVA TEORICA    —○— CURVA MEDIDA EN CAMPO



## SECCION B-B´

### SEV 1

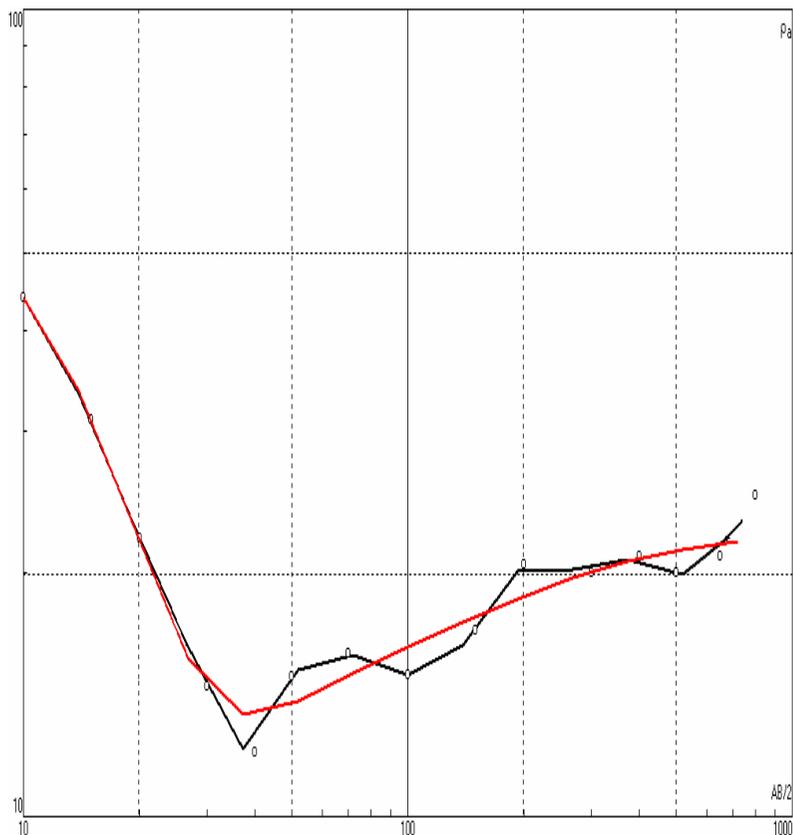
AB/2 (mts)	$\rho$ (ohm-m)
10	44
15	31
20	22.1
30	14.5
40	12
50	14.9
70	15.9
100	15
150	17
200	20.5
300	20
400	21
500	20
650	21
800	25

No. Capas	$\rho$	h	d
1	57.7	7.42	7.42
2	6.85	9.57	16.99
3	17.4	62.9	79.9
4	20.3	775	800
5	136		

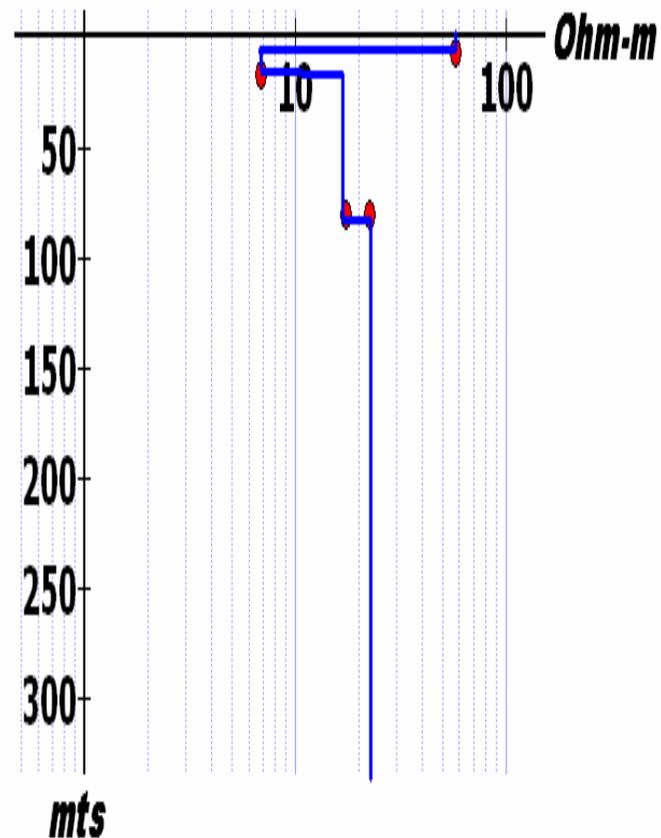
Error de ajuste entre las curvas teórica y práctica 5.71%



### DATOS PROCESADOS



### PROFUNDIDAD DE CAPAS



— CURVA TEORICA      —○— CURVA MEDIDA EN CAMPO



## SECCION B-B´

### SEV 2

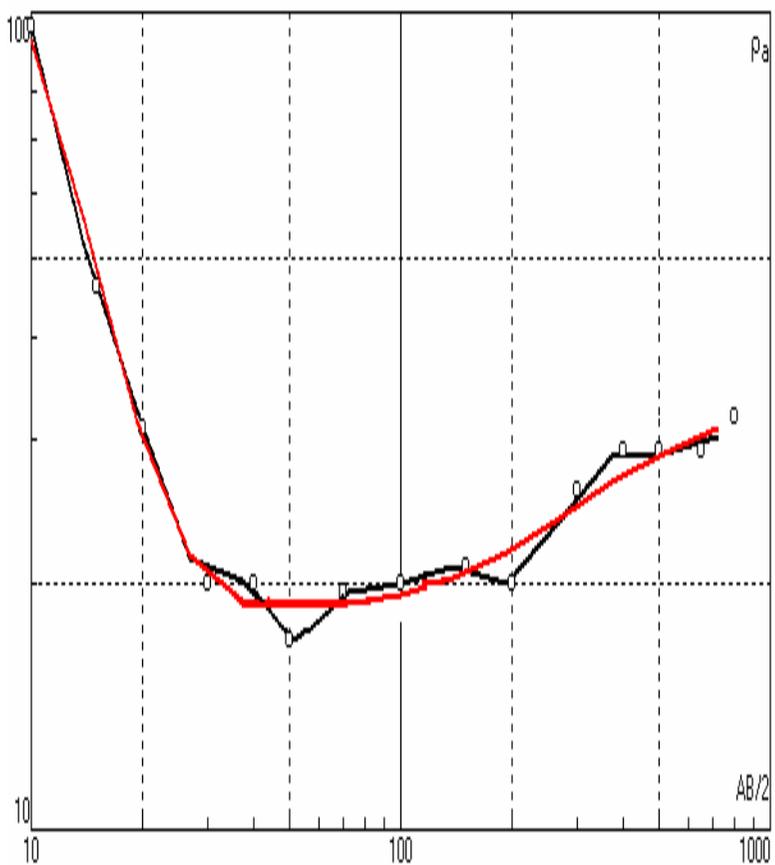
AB/2 (mts)	$\rho$ (ohm-m)
10	96
15	46.1
20	31
30	20
40	20
50	17
70	19.5
100	20
150	21
200	20
300	26
400	29
500	29
650	29
800	32

No. Capas	$\rho$	h	d
1	180	5	5
2	17.2	17.3	22.3
3	18.9	99.5	122
4	35		

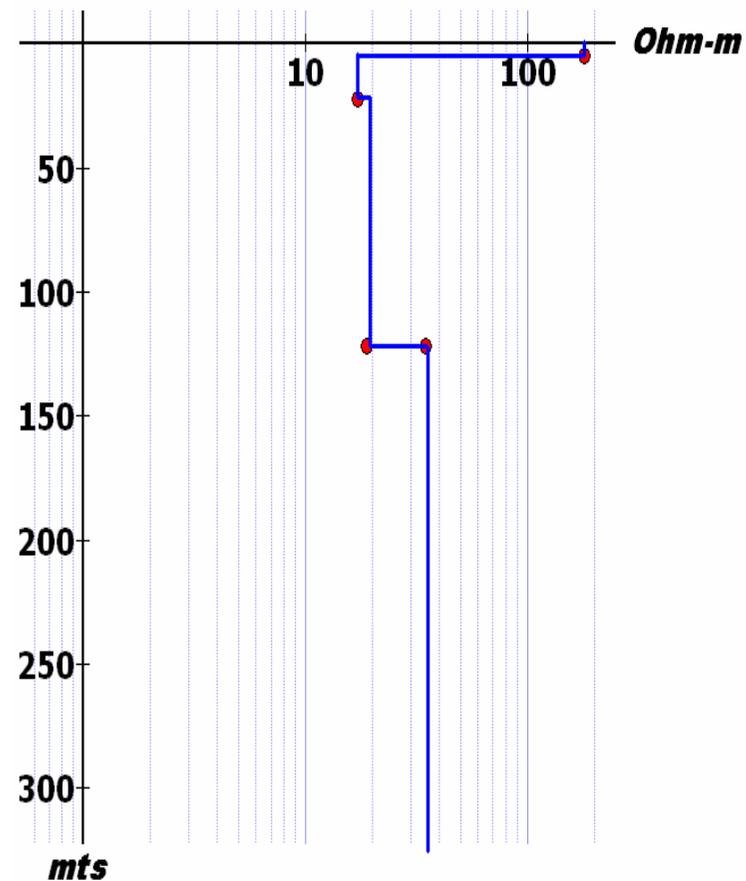
Error de ajuste entre las curvas teórica y práctica 5.04%



### DATOS PROCESADOS



### PROFUNDIDAD DE CAPAS



— CURVA TEORICA      —○— CURVA MEDIDA EN CAMPO



## SECCION B-B´

### SEV 3

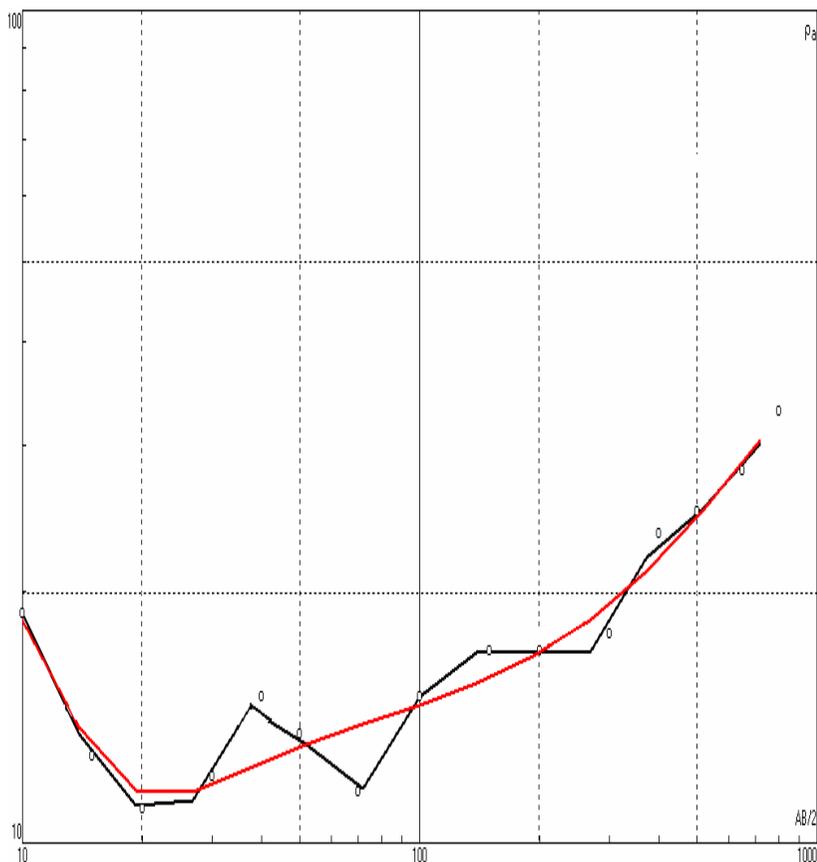
AB/2 (mts)	$\rho$ (ohm-m)
10	18.9
15	12.7
20	11
30	12
40	15
50	13.5
70	11.5
100	15
150	17
200	17
300	17.8
400	23.5
500	25
650	28
800	32

No. Capas	$\rho$	h	d
1	32.2	5	5
2	1.02	0.755	5.76
3	14.3	52.4	58.2
4	17.4	190	249
5	35		

Error de ajuste entre las curvas teórica y práctica 7.44%

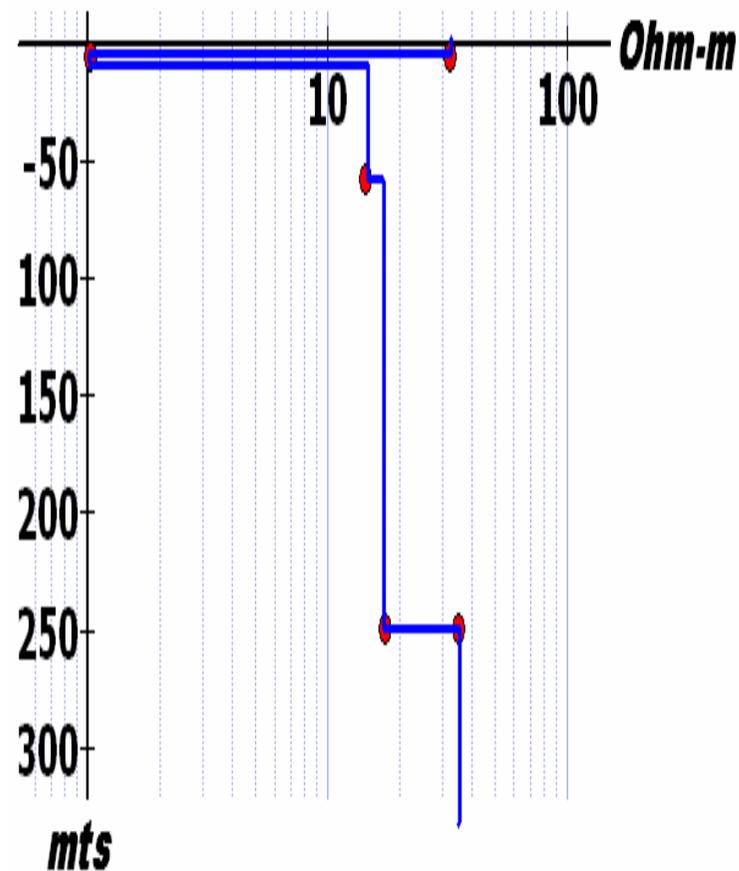


### DATOS PROCESADOS



— CURVA TEORICA    —○— CURVA MEDIDA EN CAMPO

### PROFUNDIDAD DE CAPAS





ROCA/SUELOS/AGUA	RESISTIVIDAD $\Omega - m$
ARCILLAS	1 - 20
ARENAS	50 - 500
ARENISCAS	50 - 5,000
ALUVIONES	50 - 800
ARENAS Y GRAVAS SECAS	1,000 - 10,000
ARENAS Y GRAVAS CON AGUA DULCE	50 - 500
ARENAS Y GRAVAS CON AGUA SALADA	0.5 - 5
ARENAS ARCILLOSAS	50 - 300
ARENAS CUARCITICAS	30 - 10,000
AGUAS SUBTERRÁNEAS EN GRANITO Y ROCAS METAMÓRFICAS	20 - 100
AGUAS SUBTERRÁNEAS EN CALIZAS Y ACARREOS	20 - 50
AGUAS SALOBRES	1 - 10
AGUA POTABLE SUPERFICIAL	20 - 300
AGUA DE MAR	<.02
AGUA DESTILADA	>500
CONGLOMERADO	1,000 - 10,000
CALIZAS	300 - 10,000
ESQUITOS GRAFITOSOS	0.5 - 5
ESQUITOS ARCILLOSOS O ALTERADOS	100 - 300
ESQUITOS SANOS	300 - 3,000
GRANITO	300 - 10,000
GNEISS Y GRANITO ALTERADO	100 - 1,000
GNEISS SANO	1,000 - 10,000
GRAVAS	100 - 10,000
LIMOS	30 - 500
MARGAS	50 - 5,000
LAVAS (ANDESITAS, BASALTOS Y RIOLITAS)	300 - 10,000
TOBAS VOLCÁNICAS	20 - 100

**Tabla 1. Resistividades comunes de rocas y/o materiales y agua en diferentes estados. (STC, 2007)**



FIGURA A1  
**PERFIL GEOELECTRICO SECCION A-A'**

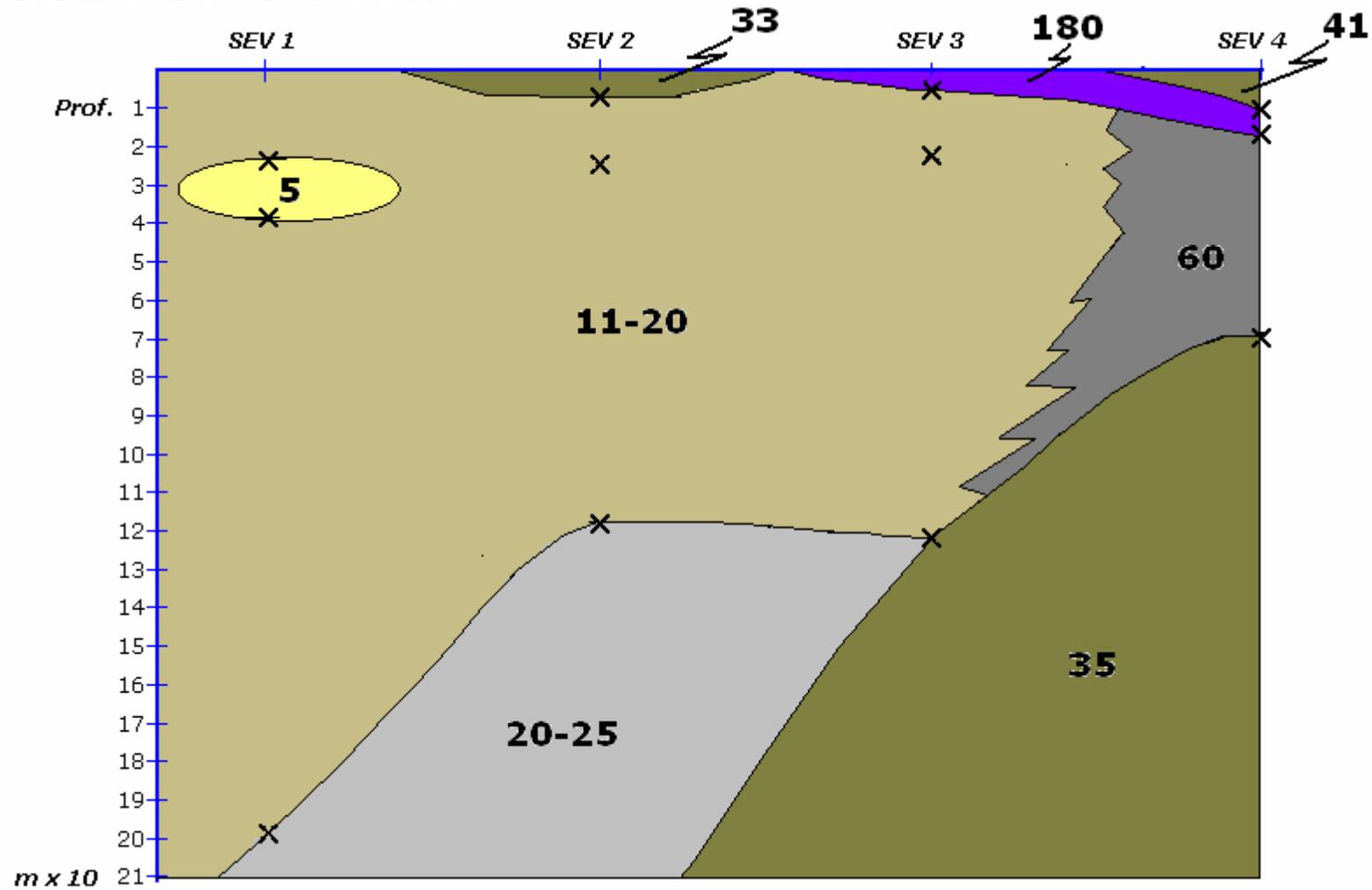




FIGURA A2  
**PERFIL GEOELECTRICO SECCION B-B'**

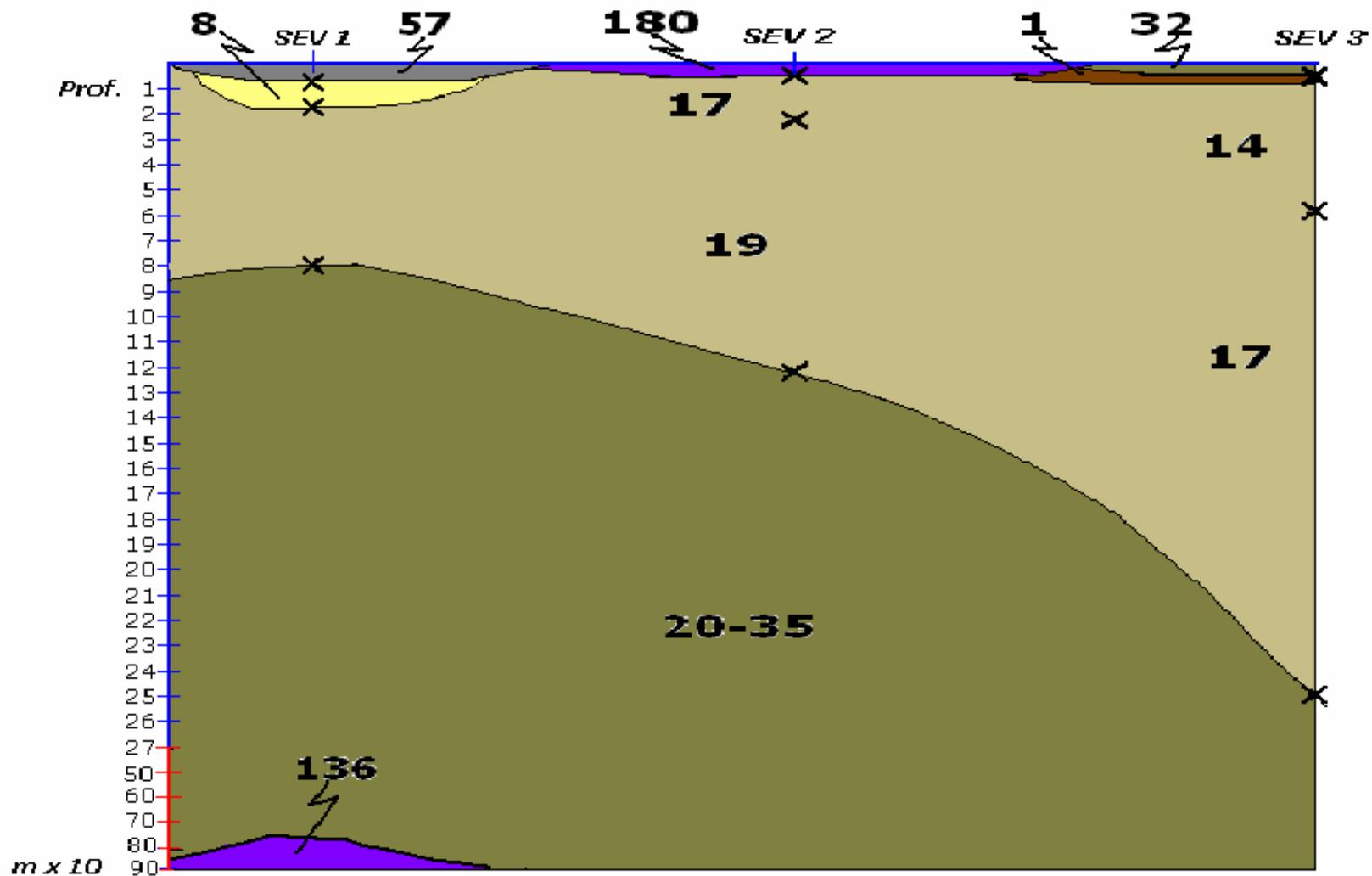




FIGURA A3

**SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE A-A'**

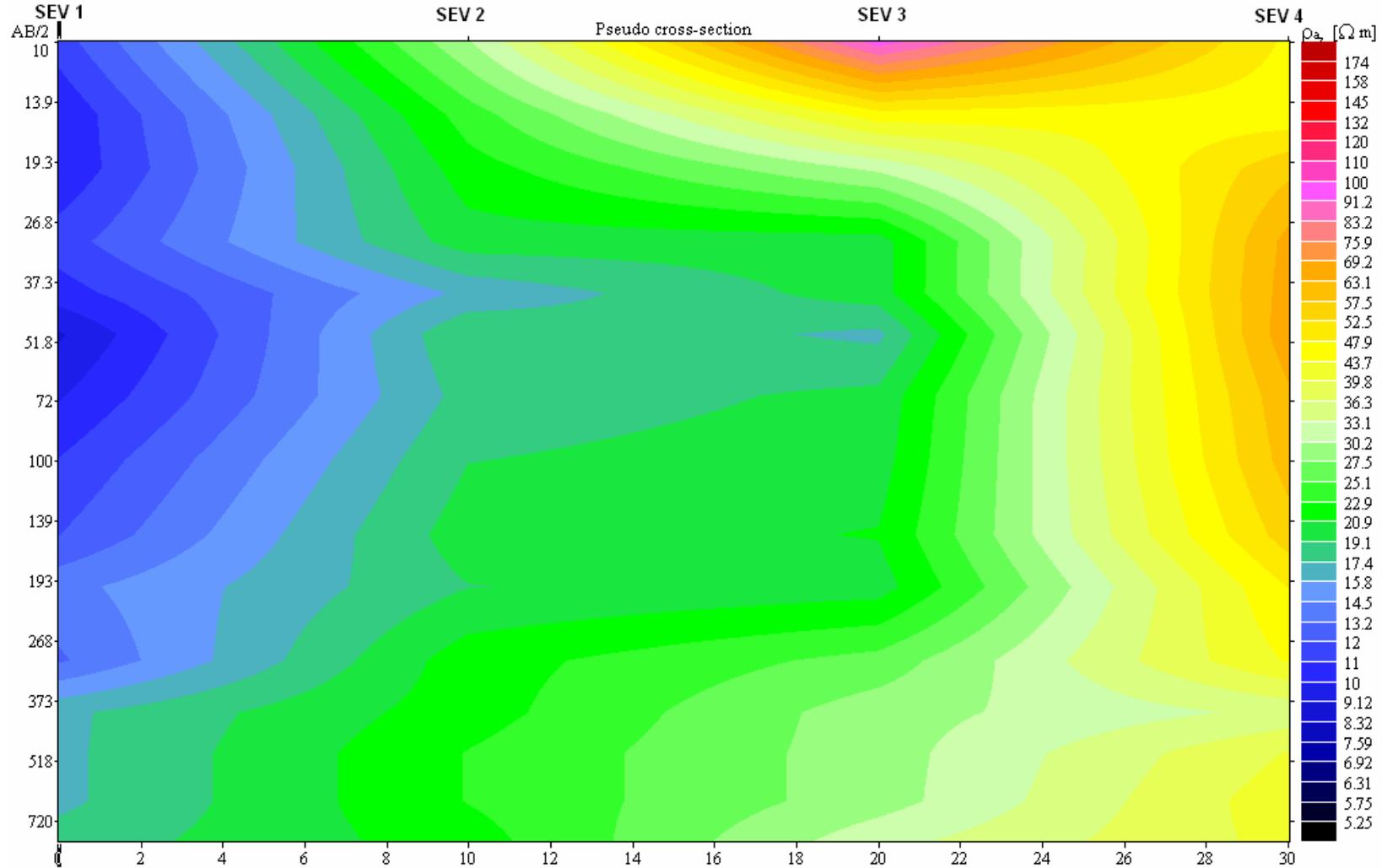




FIGURA A4

**SECCION DE ISO-RESISTIVIDAD APARENTE B-B'**

