



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

---

---

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**AREA ACADEMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES**

**" Inversión de datos geoelectricos para la identificación  
del potencial acuifero en valles aluviales: caso Valle  
Pachuca-Tizayuca, Estado de Hidalgo "**

Tesis que para obtener el titulo de:

**Ingeniero Geólogo Ambiental**

Presenta:

**Daniel González Rivera**

Director de tesis:

**Dr. Lazaro Raymundo Reyes Gutiérrez**

Director externo:

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

Pachuca de Soto, Febrero 2009

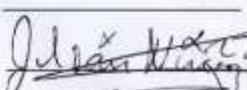
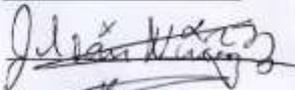
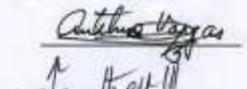
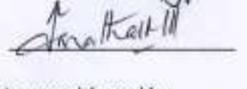


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**  
**DIRECCIÓN**

M. en C. Julio César Leines Medécigo  
Director de Control Escolar de la  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Presente

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado al pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental: **DANIEL GONZALEZ RIVERA**, quien presenta el trabajo de: **"INVERSIÓN DE DATOS GEOELÉCTRICOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL POTENCIAL ACUIFERO EN VALLES ALUVIALES : CASO VALLE PACHUCA-TIZAYUCA, ESTADO DE HIDALGO"**, después de revisar el trabajo ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE: M. en C. Timoteo Camargo Cruz   
PRIMER VOCAL: Dr. Lázaro Raymundo Reyes Gutiérrez   
SEGUNDO VOCAL: Dr. Kinardo Flores Castro   
TERCER VOCAL: Dr. Julián Núñez Benítez   
SECRETARIO: M. en C. Evodio Pedro Castañeda Ovando   
PRIMER SUPLENTE: Dr. Antelmo Vargas Blancas   
SEGUNDO SUPLENTE: Dr. Jonathan Muthuswamy Ponniah 

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente  
"Amor, Orden y Progreso"  
Mineral de la Reforma, Hgo., a 13 de Febrero de 2009

  
M. en C. Octavio Castillo Acosta  
Director



## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres: A quienes me han heredado el tesoro mas valioso que se le puede dar a un hijo, amor. A quienes sin escatimar esfuerzo alguno, han sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme. A quienes la ilusión de su vida ha sido convertirme en persona de provecho, nunca podre pagar sus desvelos, ni aun con las riquezas más grandes del mundo, gracias por darme la vida:

María Elena, Juan Angel.

A mis hermanos:

Fernando, Lissette, Julio, por el apoyo moral y espiritual que siempre me brindaron.

A mis tías que me apoyaron en momentos difíciles.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Dr. Lázaro Raymundo Reyes Gutiérrez por la dirección del presente trabajo de tesis. Humildemente agradezco al Dr. José Alfredo Ramos leal por el apoyo incondicional que me brindo en mi estancia realizada en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.

Agradezco al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica por el apoyo que me brindo y por admitirme como estudiante externo y a todos los doctores que conforman la división de Geociencias Aplicadas por el cálido recibimiento.

Agradezco a todos los profesores y doctores de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por compartir sus conocimientos conmigo.

Agradezco a mis compañeros y amigos, con los cuales compartí momentos agradables y complicados durante todos estos años; especialmente a: Eumir Herrera Gutiérrez; Christian Camargo Soto, Diego Juárez Alvarado quienes con su ayuda fue posible hacer la prospección geofísica en el Valle Pachuca-Tizayuca, y a mi amigo Federico Navarrete Ramírez quien me apoyo en las actividades de informática.

Finalmente agradezco a mi gran familia quienes son el motivo de inspiración de mi vida; mi respeto y reconocimiento por su ejemplo e incondicional apoyo.....gracias.

Agradezco humildemente a todos.

Daniel González Rivera.

## RESUMEN

El agua subterránea es un recurso de interés mundial y seguridad nacional, el cual incrementa su valor económico, dadas las condiciones climáticas y geográficas de cada región. Por medio de la prospección geoelectrica aplicada en el Valle Pachuca-Tizayuca se midió la respuesta eléctrica de los materiales geológicos presentes en el subsuelo, con el fin de evaluar de manera indirecta zonas de potencial acuífero e identificar la presencia de horizontes saturado, susceptibles de ser explotados mediante pozos de extracción.

El presente estudio geofísico –geoelectrico consistió en la ejecución de 31 sondeos eléctricos verticales (SEVs) distribuidos uniformemente con centros virtuales cada 500 m; en la modalidad dispositivo tetraelectrodico schlumberger, según lo permitieron las condiciones del sitio. La metodología aplicada con apoyo geológico ha permitido determinar la disposición de unidades saturadas a profundidades del orden de los 60 a 100 m. A partir de modelos teóricos calculados de cada sondeo eléctrico vertical (SEV) se construyeron 9 perfiles geoelectricos con lo cual se realizo el modelado de la zona estudiada; Se identificaron dos acuíferos importantes para el abastecimiento de la ciudad de Pachuca y México. el primero corresponde a un acuífero granular representado por material aluvial de relleno, el segundo es un acuífero fracturado correspondiente a rocas volcánicas terciarias procedentes del Grupo Pachuca alteradas y/o fracturadas, perturbadas tectónicamente el cual se caracteriza por la presencia de pilares y fosas, que son rellenadas por el material aluvial interdigitado con lavas volcánicas cuaternarias.

## **ABSTRACT**

The groundwater is a resource of world interest and national security, which increases its economic, given value the climatic and geographical conditions of each region. By means of the prospecting geoelectric applied in the Valley Pachuca-Tizayuca the electric answer of the materials geologic present it was measured in the underground, with the purpose of to evaluate in way indirect areas of aquifer potential and to identify the saturated presence of horizons, susceptible of being exploited by means of extraction wells.

The present geophysical study consisted on the execution of 31 electric ones vertical electric sounding (VES) distributed evenly with virtual centers each 500 m; in the modality device tetraelectrode schlumberger, according to they allowed it the conditions of the place. The methodology applied with with geologic support it has allowed to determine the disposition of units saturated to depths of the order from the 60 to 100 m. starting from calculated theoretical models of each vertical vertical electric sounding (VES) 9 were built you profile geoelectric with that which one carries out the modeling of the studied area; Two important aquifers were identified for the supply of the city of Pachuca and Mexico. The first layer corresponds to granular aquifer, is represented by alluvial material of filler, the second is a fractured aquifer, corresponding to Tertiary volcanic rocks of the Pachuca Group altered and/or fractured, by tectonic, is characterized by the presence of pillars and grabens fillings with alluvial material, interdigitated with quaternary spill basaltic.

# ÍNDICE

Página

## CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1.	Introducción.....	1
1.2.	Objetivo general.....	1
1.2.1.	Objetivos específicos.....	2
1.3.	Hipótesis de trabajo .....	2
1.4.	Justificación.....	2
1.5.	Antecedentes.....	3
1.6.	Método de estudio.....	4

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO DE LA EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

2.1.	Principio teórico de los métodos eléctricos.....	7
2.2.	Ecuación general para el potencial eléctrico.....	8
2.2.1	Medición de la Resistividad.....	12
2.2.2.	Dispositivo de Medida Schlumberger.....	14
2.3.	Flujo de corriente en un medio estratificado horizontal.....	15
2.3.1.	Penetración de la Corriente.....	21
2.3.2	Profundidad de investigación.....	22
2.4.	Resistividad aparente.....	25
2.5.	Tipos de curvas características.....	28

## CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.	Localización del área de estudio .....	30
3.2.	Vías de acceso.....	30
3.3.	Fisiografía.....	32

3.4.	Geomorfología.....	32
3.5.	Clima.....	33
3.6.	Hidrología.....	33

#### **CAPÍTULO 4.**

#### **GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO**

4.1.	Marco geológico regional.....	36
4.2.	Geología local.....	38
4.2.1.	<i>Depósitos Terciarios</i> .....	38
4.2.2.	<i>Depósitos Plio-Cuaternarios</i> .....	39
4.2.3.	<i>Depósitos Cuaternarios</i> .....	40
4.2.4.	<i>Rocas intrusivas</i> .....	41
4.3.	Marco Tectónico.....	41

#### **CAPÍTULO 5**

#### **ASOCIACIÓN DE LA RESPUESTA GEOELÉCTRICA CON LA LITOLOGÍA DEL SUBSUELO**

5.1.	Método de operación de campo .....	45
5.2.	Equipo empleado.....	47
5.3.	Levantamiento geoelectrico.....	48

#### **CAPÍTULO 6.**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

6.1.	Procesamiento de Datos Geoelectricos.....	51
6.1.1.	Interpretación de curvas de resistividades aparentes.....	51
6.1.2.	Mapas de resistividad aparente.....	56
6.2.	Descripción de perfiles.....	59
6.3.	Evaluacion de Zonas Potenciales.....	76
6.4.	Modelo Conceptual.....	78

## **CAPÍTULO 7.**

7.1	Conclusiones.....	81
7.2	Recomendaciones.....	82
7.3.	Bibliografía.....	83

	<b>ANEXO A</b>	<b>87</b>
--	----------------	-----------

# ÍNDICE DE FIGURAS

Página

<b>Figura 2.1.</b> Electrodo puntual de emisión de corriente continua y la distribución resultante.....	11
<b>Figura 2.2.</b> Distribución del potencial causado por un par de electrodos de corriente en un semi-espacio homogéneo. La corriente entra por el electrodo <b>A</b> y sale por el electrodo <b>B</b> .....	12
<b>Figura 2.3.</b> Arreglo tetrapolar Schlumberger.....	13
<b>Figura 2.4.</b> Medio Multiestratificado.....	15
<b>Figura 2.5.</b> Distribución de corriente en un medio multiestratificado.....	23
<b>Figura 2.6.</b> Sondeo eléctrico Vertical (SEV) que muestra la resistividad aparente en función del espaciado medio del dipolo de corriente.....	27
<b>Figura 2.7.</b> Tipo de curva característica.....	29
<b>Figura 3.1.</b> Localización del área de estudio .....	31
<b>Figura 3.2.</b> Corrientes principales y red de drenaje.....	35
<b>Figura 4.1.</b> Columna estratigráfica de la Subcuenca Pachuca-Tizayuca.....	42
<b>Figura 4.2.</b> Mapa geológico de la Subcuenca Pachuca-Tizayuca.....	44
<b>Figura 5.1.</b> Equipo Bison 2350 B usado en campo.....	47
<b>Figura 5.2.</b> Distribución de los SEVs en el área de estudio.....	50
<b>Figura 6.1.</b> Tipo de curvas teóricas para diferentes modelos de capas en el área de estudio.....	52
<b>Figura 6.2.</b> Mapa que muestra la distribución de los tipos de curvas de los SEVs en el área de estudio, los dominios en función de la familia de curvas y las zonas de potencial acuífero.....	54
<b>Figura 6.3.</b> Mapa que muestra la distribución de la resistividad aparente a diferentes aberturas de $\dots AB/2$ (50, 100, 200 y 500).....	57
<b>Figura 6.4. a)</b> Pseudosección de resistividad aparente PACH1-Tellez, <b>b)</b> Sección geoelectrica PACH-Tellez.....	60
<b>Figura 6.5. a)</b> Pseudosección de resistividad aparente PACH2-Nopalapa, <b>b)</b> Sección geoelectrica PACH2-Nopalapa.....	62
<b>Figura 6.6. a)</b> Pseudosección de resistividad aparente PACH3-La Noria, <b>b)</b> Sección geoelectrica PACH3-La Noria.....	64

<b>Figura 6.7. a)</b> Pseudosección de resistividad aparente PACH4-La Higa, <b>b)</b> Sección geoelectrica PACH4-La Higa. ....	66
<b>Figura 6.8. a)</b> Pseudosección de resistividad aparente PACH5-Acayuca, <b>b)</b> Sección geoelectrica PACH5-Acayuca. ....	68
<b>Figura 6.9. a)</b> Pseudosección de resistividad aparente PACH6- Acayuca II, <b>b)</b> Sección geoelectrica PACH6-Acayuca II. ....	71
<b>Figura 6.10. a)</b> Pseudosección de resistividad aparente PACH7-Zapotlan, <b>b)</b> Sección geoelectrica PACH7-Zapotlan. ....	72
<b>Figura 6.11. a)</b> Pseudosección de resistividad aparente PACH8-Vicente Guerrero, <b>b)</b> Sección geoelectrica PACH8-Vicente Guerrero.....	74
<b>Figura 6.12. a)</b> Pseudosección de resistividad aparente PACH9-Tezontepec, <b>b)</b> Sección geoelectrica PACH9-Tezontepec.....	77
<b>Figura 6.13. a)</b> Modelo geológico-geoelectrico . ....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 2.1.</b> Clasificación de curvas.....	28
<b>Tabla 5.1.</b> Resistividades comunes de rocas y/o materiales y agua.....	46
<b>Tabla 5.2.</b> Coordenadas de los SEVs en el área de estudio.....	48
<b>Tabla 6.1</b> Parámetros geoelectricos y tipo de curva en el área de estudio.....	55

# Capítulo 1

---

## I. GENERALIDADES

### 1.1. Introducción

El agua subterránea se ha convertido en un recurso de interés mundial y seguridad nacional en los últimos tiempos, este recurso incrementa notablemente su valor económico debido al crecimiento demográfico, la situación geográfica. Debido a sobre extracción de pozos de abastecimiento, las fuentes potenciales de agua subterránea se localizan cada vez a mayores profundidades no asegurando una buena calidad de éstas. Por este motivo en el presente trabajo se realizó un estudio geofísico-geoelectrico con fines hidrogeológicos en el Valle Pachuca-Tizayuca perteneciente a la subcuenca del Río de las Avenidas; aplicando el método de Sondeo Eléctrico Vertical, siendo el más viable ya que tiene un gran poder resolutivo dentro de la hidrogeología y es un método económico comparado con otros métodos directos

La aplicación de los métodos geofísicos al estudio de los sistemas acuíferos es relativamente reciente, tradicionalmente se enfocaban a la exploración de yacimientos económicos, tales como recursos petroleros y minerales principalmente. ( Orellana, 1972).

La metodología empleada tiene gran importancia que permitirá definir contrastes resistivos en los cuales se diferencien las capas geológicas que constituyen el subsuelo, con el fin de localizar zonas potenciales acuíferas para el abastecimiento de agua potable a las ciudades de Pachuca y México. En este trabajo se presenta una forma clara de las condiciones hidrogeológicas del Valle Pachuca Tizayuca.

### 1.2. Objetivo general

El objetivo del presente trabajo consiste en explorar de manera indirecta las principales zonas de potencial acuífero, mediante la aplicación de sondeos eléctricos verticales (SEVs), en el Valle Pachuca Tizayuca .

### **1.2.1. Objetivos específicos**

- Efectuar mediciones de resistividad eléctrica en el subsuelo por el método del sondeo eléctrico vertical.
- Conocer la estructura hidrogeológica del Valle Pachuca-Tizayuca.
- Determinar mediante interpretación geológica y geoelectrica unidades o paquetes de roca con posibilidades de almacenar agua subterránea susceptible de ser explotada mediante pozos.
- Construcción de un modelo conceptual del acuífero en la zona de estudio.
- Definir hidrogeológicamente las unidades que representen las mayores posibilidades acuíferas.

### **1.3. Hipótesis de trabajo**

Dadas las condiciones geológicas, estructurales de la zona del Valle Pachuca Tizayuca es posible encontrar paquetes saturados de agua subterránea mediante la inyección de corriente eléctrica mediante sondeos eléctricos verticales (SEVs) en la modalidad del dispositivo tetrapolar Schlumberger.

### **1.4. Justificación**

Debido a que la ciudad de Pachuca presenta un déficit de 960 l/seg según la Comisión de Agua y Alcantarillado de Servicios Intermunicipales (CAASIM, 2005), el municipio no estará en condiciones de asegurar el abasto a la región de Pachuca, dado el acelerado crecimiento urbano que ha registrado la misma. El municipio de Pachuca requiere localizar más fuentes de abastecimiento para cubrir la demanda de agua a la población. Por este motivo, es necesario realizar exploraciones del subsuelo con técnicas indirectas como los métodos geofísicos para la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento en áreas cercanas a la ciudad de Pachuca. El presente trabajo está orientado a realizar exploraciones geofísicas aplicando el método de sondeos eléctricos verticales en el valle de Pachuca Tizayuca.

### 1.5. Antecedentes

Como parte de la recopilación y análisis de la información existente disponible, se consultaron diversos trabajos previos, relacionados con la geología, hidrogeología y geofísica de la región. A continuación se mencionan dichos trabajos.

- 1990 Reyes-Gutiérrez L.R. Estudio geofísico de la distribución de cavernas en el poblado de Real del Monte Hgo. México.
- 1991 THORSA, Ingenieros Consultores y constructores, S.A. de C.V. Actualización geohidrológica en el valle de Pachuca-Tizayuca, Estado de Hidalgo.
- 1995 Serrano, F. Dictamen geohidrológico de Tolcayuca, Hidalgo. En: Comisión Nacional del Agua (CNA).
- 1999 Geofísica y perforaciones del medio ambiente S.C. Estudio de prospección geoelectrica en la granja Kadabanchel municipio de Tolcayuca, Hidalgo.
- 2001 Geopsa, S.A. de C.V. Estudio geológico-geofísico en el Rancho para la comunidad Vicente Guerrero municipio de Tolcayuca, Hidalgo.
- 2002 Comisión Nacional del Agua (CNA). Sobre la determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuautitlan-Pachuca Estados de México e Hidalgo.
- 2003 Huízar y colaboradores. Estructura geológica y flujo del agua subterránea en la subcuenca Pachuca-Zumpango, Centro de México.

## **1.6. Método de estudio**

La metodología general seguida en este trabajo de investigación comprende labores llevadas a cabo en dos ámbitos distintos: gabinete y campo.

### ***Gabinete***

El presente estudio comenzó a desarrollarse con la recopilación bibliográfica relevante de la información geológica, hidrogeológica y geofísica disponible, relacionada al área de estudio con la finalidad de conocer de una manera preliminar las condiciones geológicas-hidrogeológicas y de esta manera programar Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) con el dispositivo tetraelectródico Schlumberger simétrico (Orellana, 1972). Dentro de esta recopilación se incluyen inventarios de pozos de agua, la cartografía geológica de la zona y estudios geofísicos previos. Para esta recopilación fueron consultados principalmente los archivos de la Comisión Nacional del Agua (CNA, ahora CONAGUA) y la biblioteca del Instituto de Geofísica-UNAM.

La parte final de esta etapa comprende el análisis, inversión e interpretación de los datos geoelectrónicos obtenidos en campo.

El análisis de los datos de los SEVs se efectuó primero en forma cualitativa, representando secciones de pseudo-resistividad aparente, mediante interpolación de iso-resistividades con el programa de cómputo SURFER 8 (Golden Software Inc., 2002), y definiendo el tipo de curvas a fin de detectar cambios laterales de estructuras y facilitar la ubicación de fracturas y otras anomalías presentes (tales como, por ejemplo, aumento o disminución de niveles salinos laterales). Posteriormente, se procedió al cálculo cuantitativo de resistividades y espesores reales, electroestratos y construcción de gráficos unidimensionales, 1-D, mediante el proceso de inversión de datos para recuperar el modelo geoelectrónico, usando como apoyo el programa de cómputo Resix Plus, obteniendo los modelos geoelectrónicos de capas, representativos del subsuelo en el área de interés.

El programa de inversión estima un modelo de referencia (curva de campo) y un modelo inicial (curva teórica). Un aspecto importante para la obtención de buenos resultados durante la interpretación, es mantener desde el momento de la generación de los datos de campo un intervalo de confianza muy reducido para que el error de estimación sea mínimo, normalmente menor del 10%, y proseguir con el mismo principio durante la interpretación; en el presente estudio se consideró adecuado un error por debajo del 5%, obteniéndose un buen ajuste entre la curva teórica y la curva de campo.

El trabajo de gabinete continuo con la interpretación cualitativa construyendo perfiles o pseudosecciones de isoresistividad aparente para estimar el comportamiento y/o tendencias geoelectricas del perfil. Estos perfiles dan una imagen general de la distribución de máximos y mínimos de cambios resistivos y conductivos, respectivamente. Esta interpretación se realizó configurando los datos de resistividad aparente en función de la separación interelectrónica, en este caso se utilizó el programa Surfer 8 (Golden Software Inc., 2002), para realizar las configuraciones y así obtener la sección de isoresistividad aparente.

### ***Campo***

El trabajo de campo se inició con la ubicación de distintas líneas geoelectricas en el área de estudio. El estudio de prospección eléctrica de superficie, mediante el arreglo tetraelectrónico Schlumberger simétrico (Orellana, 1972), consistió en la ejecución de 31 sondeos eléctricos verticales (SEVs).

La base fundamental de los criterios adoptados para realizar la prospección eléctrica de superficie en el área de estudio son:

- El conocimiento de la evolución geológica.
- Distribución de sondeos eléctricos en función de los elementos geomorfológicos.
- Uso del dispositivo tetraelectrónico Schlumberger simétrico.
- Los sondeos se realizan hasta separaciones de electrodos que aseguren la penetración de la corriente a la profundidad necesaria.

Como se ha método operativo previamente el método operativo que se usó en campo fue el arreglo tetraelectrónico Schlumberger simétrico, con variación de electrodos de potencial desde 1 hasta 50 m como máximo de **MN** y una abertura de **AB** (emisión de corriente), de 500 m para todos los sitios.

La ventaja del arreglo es que minimiza la variación lateral de cambios en la geología, así como el efecto superficial y aumenta la profundidad de penetración de la corriente. Las separaciones entre electrodos, **AB/2**, empleadas en el relevamiento de los SEVs fueron: 2 – 3 – 4 – 6 – 8 – 10 – 12 – 16 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 70 – 80 – 100 – 120 – 140 – 160 – 180 – 200 – 250 – 300 – 350 – 400 – 450 – 500 m, para alcanzar una profundidad de investigación entre 60 y 320 m. La proporción entre la distancia de **MN** y la distancia **AB** varía entre 1/3 a aproximadamente 1/10 (Parasnis, 1997).

Para cada sondeo eléctrico, a partir de los valores del potencial medido y de las lecturas de corriente inyectada, se graficaron los valores calculados de resistividad  $\rho$  contra la distancia **AB/2** (m) en papel doble logarítmico (ver Apéndice A), resultando la curva de resistividad aparente,  $\rho_a$  (Ohm-m). Posteriormente se realizó un ajuste por “empalme”, convirtiendo las curvas de cada SEV en trazos continuos. En estas gráficas se observa que los puntos de inflexión característicos corresponden a cambios en las propiedades físicas del subsuelo y están directamente relacionados a cambios litológicos, esta información analizada adecuadamente con la información geológica, es de gran importancia, pues de ello depende una interpretación acertada de la interpretación litológica del subsuelo.

Una vez obtenidas las curvas de resistividad aparente (curva de campo) para cada SEV, como primera aproximación, se genera un modelo con el método del punto auxiliar, empleando curvas patrón de dos capas y sus correspondientes gráficas auxiliares A, H, K y Q; realizando los cálculos correspondientes se obtienen los valores de las resistividades y espesores verdaderos.

Finalmente, el modelo de SEV preliminar fue ajustado, suavizado de curvas, con el programa de computo Resix Plus, con el cual se obtuvieron los modelos de capas o cortes geoelectrónicos para cada SEV.

La interpretación cuantitativa de los datos de la resistividad eléctrica se hace considerando la variación en la resistividad aparente en cada separación eléctrica manteniendo fijo el punto de observación.

# Capítulo 2

---

## 2. MARCO TEÓRICO DE LA EXPLORACIÓN GEOELÉCTRICA

### 2.1. Principio teórico de los métodos eléctricos

La Prospección Geofísica puede definirse como una técnica que permite efectuar un diagnóstico de la constitución del subsuelo por interpretación de unos datos que son el resultado de unas mediciones y de unos cálculos. El propósito de las investigaciones eléctricas, consiste en determinar la distribución de la resistividad del subsuelo haciendo mediciones en la superficie del terreno. De estas mediciones, se puede estimar la resistividad y espesor verdaderos del subsuelo.

Los estudios geofísicos que involucran la inyección de corriente a partir de electrodos ubicados en la superficie del terreno, generalmente se conocen como métodos de corriente directa o DC, aunque en realidad en la práctica la polaridad se invierte a intervalos regulares (típicamente de 1 a 4 segundos) para cancelar efectos de polarización del medio.

Los métodos eléctricos de corriente directa permiten el reconocimiento del subsuelo a partir de la resistividad de las formaciones que la constituyen. Tanto en la forma de sondeos como calicatas, estas técnicas son muy utilizadas en la exploración hidrogeológica gracias a la relación que tiene la resistividad eléctrica del terreno con diferentes parámetros geológicos tales como la porosidad de la roca y grado de saturación, la mineralización del agua y por otra parte con el contenido de arcilla en la roca. Sin embargo, las siguientes condiciones se tienen que cumplir para que el método sea efectivo:

1. Las diversas formaciones litológicas deben estar netamente caracterizadas por resistividades diferentes.
2. Las diversas formaciones litológicas deben ser aproximadamente horizontales (< 15° aprox.).

3. Las corrientes eléctricas suministradas al terreno desde la superficie deben ser capaces de penetrar a las profundidades de los objetivos a estudiar.
4. Las deformaciones del campo eléctrico debidas a las heterogeneidades del subsuelo deben ser medibles desde la superficie.

Principalmente hay cuatro factores que influyen directamente sobre la resistividad del subsuelo:

1. La porosidad de la roca: a mayor porosidad ya sea intrínseca o de fractura, menor resistividad.
2. La conductividad del agua: a mayor conductividad del agua (más salada), menor resistividad en la roca que la contiene.
3. Contenido de arcilla del terreno: a mayor contenido arcilloso, menor resistividad.
4. La temperatura del agua: a mayor temperatura del agua menor resistividad en la roca que la contiene.

Las técnicas de resistividad con CD pueden usarse en modo de perfilado (arreglos Wenner, polo-dipolo, dipolo-dipolo), para mapear cambios laterales e identificar cambios cuasi-verticales (por ejemplo, zonas de fractura), o pueden usarse en modo de sondeo (sondeo Schlumberger) para determinar la profundidad de horizontes geoelectricos (por ejemplo, profundidad al agua subterránea salina).

## **2.2. Ecuación general para el potencial eléctrico**

La teoría empleada en el método de prospección eléctrica se fundamenta en la teoría del **potencial eléctrico**. Las ecuaciones de Laplace, Poisson y la teoría del potencial, desarrolladas por Maxwell y extendidas por otros autores, actualmente fundamentan las bases para la interpretación de la resistividad.

La aproximación más sencilla del estudio teórico de la distribución de la resistividad en el terreno parte de considerar a éste, totalmente homogéneo e isotrópico (sus propiedades no dependen de la dirección en que sean medidas). Bajo estas condiciones, la ecuación del potencial debido a una fuente puntual de corriente puede desarrollarse a partir de dos leyes fundamentales:

1. La ley de Ohm generalizada.

$$\bar{E} = \frac{J}{\sigma} = \rho \bar{J} = \quad (1)$$

que representa la relación existente entre un campo eléctrico  $E$  ( $V/m$ ) y el flujo de corriente  $J$  ( $A/m^2$ ), a través de un medio de conductividad  $\sigma$  ( $Ohm^{-1}.m^{-1}$ ) y  $\rho$  es la resistividad del medio ( $Ohm.m$ ), lo cual en términos de potencial y corriente es conocido como  $V=R \cdot I$  (el potencial eléctrico es proporcional a la corriente, o bien en un medio en el cual se disipa energía, la diferencia de potencial producida por esta pérdida de energía es proporcional a la corriente transmitida).

2. La ley de continuidad o principio de conservación de la carga espacial:

$$div \bar{J} = 0 \quad (2)$$

que establece que en un medio sin cargas puntuales (cero acumulación de cargas), la corriente introducida en un volumen de control debe necesariamente salir del volumen de control a la misma tasa, a menos que en este haya una fuente o sumidero, lo cual implicaría  $div \bar{J} \neq 0$ .

En el caso específico de un campo eléctrico producto de una fuente de corriente continua, el campo eléctrico es estacionario, es decir, deriva de un potencial escalar  $V$ , tal que:

$$\bar{E} = - grad V \quad (3)$$

donde  $V$  es el potencial eléctrico (volts). La ley de Ohm ec.(1), es válida sólo en el caso de cuerpos isótropos, ya que el caso de cuerpos anisótropos, la conductividad no podría considerarse como un escalar  $\sigma$ , sino como un tensor simétrico de segundo orden.

Considerando la ecuación de continuidad y la ley de ohm, e insertando la definición de potencial escalar (ec.3), se tienen las siguientes relaciones:

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (\sigma E) = \sigma \nabla \cdot E + E \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla \cdot \nabla V + E \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla^2 V + E \cdot \nabla \sigma = 0$$

Si el medio es homogéneo el gradiente de la conductividad es cero, es decir,  $\rho$  es independiente del eje de coordenadas, de tal forma que el potencial eléctrico en condiciones estacionarias cumple la ecuación de Laplace:

$$\text{div grad } V = 0$$

ó bien,

$$\nabla^2 V = 0 \tag{4}$$

De esta manera, la distribución del potencial eléctrico para flujo de corriente directa en un medio homogéneo e isótropo satisface la ecuación de Laplace. Aplicando las expresiones anteriores al estudio de un semi-espacio formado por un medio homogéneo e isótropo, en cuya superficie suponemos una carga puntual (un electrodo de corriente en el punto considerado y el otro en el infinito), en este caso se usa la ecuación de Laplace en coordenadas esféricas, aprovechando la simetría angular del problema,

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2 \text{sen}\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \text{sen}\theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right] + \frac{1}{r^2 \text{sen}\theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} = 0 \tag{5}$$

y como el sistema presenta simetría respecto a  $\theta$  y a  $\varphi$ , se supone que el potencial depende sólo de la distancia  $r$  al electrodo, con lo que la ecuación de Laplace, se reduce a:

$$\frac{d}{dr} \left[ r^2 \frac{dV}{dr} \right] = 0$$

ó

$$\frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dV}{dr} = 0 \tag{6}$$

de cuya integración directa resulta:

$$V = c_1 + \frac{c_2}{r} \tag{7}$$

Si adoptamos como potencial nulo, el infinito, la constante de integración  $c_1 = 0$ . Mientras que la constante  $c_2$ , se calculará en términos de la corriente total, con lo que queda:

$$V = \frac{c_2}{r}$$

Es claro que las superficies equipotenciales son esféricas, y el campo eléctrico así como las líneas de corrientes son radiales. La densidad de corriente en una dirección cualquiera y, la distancia  $r$ , tendrá por modulo:

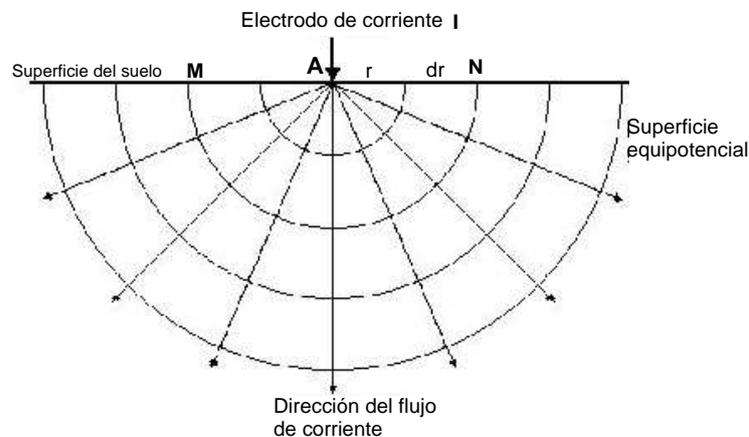
$$J = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{C_2}{r^2}$$

Como la densidad de corriente resulta ser la misma en cualquier dirección y, a la misma distancia  $r$  de un electrodo puntual **A**, la corriente **I** que penetra por el electrodo, será la misma que la que atraviesa una semiesfera de radio  $r$  (Figura 2.1) y por tanto:

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

de esta expresión se obtiene el valor de la constante  $C_2$ :

$$C_2 = \frac{I\rho}{2\pi}$$



**Figura 2.1.** Electrodo puntual de emisión de corriente continua y la distribución de potencial resultante.

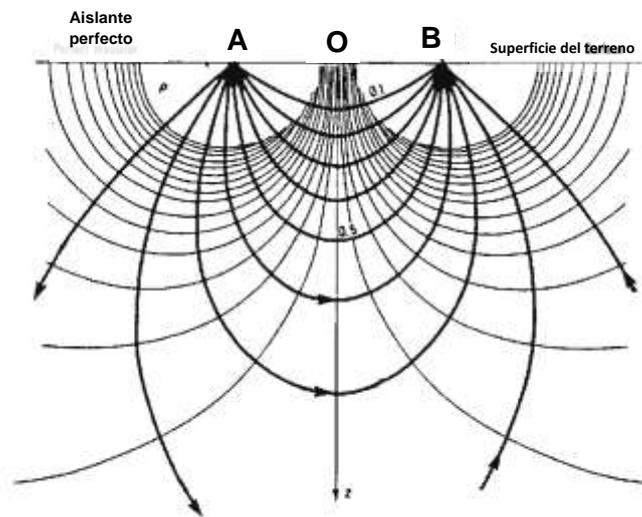
Así resuelta que el potencial debido a un electrodo puntual en la superficie de un medio homogéneo, y a una distancia  $r$  de este es:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r} \tag{8}$$

En la práctica, la corriente es introducida en el terreno por medio de dos electrodos, una fuente de corriente positiva, **A**, y una fuente de corriente negativa, **B** y el potencial en cualquier punto debido a este arreglo “dipolar” es:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (9)$$

donde  $r_1$  y  $r_2$  son las distancias del punto **P** desde la fuente y el sumidero, respectivamente. La Figura 2.2 muestra la distribución del potencial causada por un par de electrodos de corriente.



**Figura 2.2.** Distribución del potencial causado por un par de electrodos de corriente en un semiespacio homogéneo. La corriente entra por el electrodo **A** y sale por el electrodo **B**.

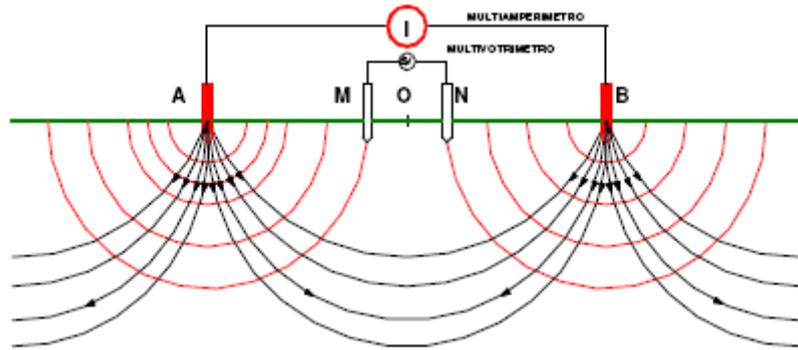
### 2.2.1. Medición de la resistividad

Como se ha mencionado anteriormente, se emplean normalmente dos electrodos **A** y **B**, uno por el que se inyecta una corriente al terreno, uniéndolo al polo positivo de una fuente de poder que puede ser una batería, y hace de fuente, otro por el que esta corriente sale del terreno, uniéndolo con el polo negativo de la fuente y que hace el sumidero.

Prácticamente en todos los estudios geoelectricos, las mediciones de la resistividad se hacen inyectando corriente en el terreno a través de los electrodos de corriente **AB** y se mide la diferencia de potencial resultante en los electrodos de potencial **MN**. Un

arreglo típico con cuatro electrodos se muestra en la Figura 2.3. La diferencia de potencial que se leerá con un voltímetro entre los puntos **M** y **N** será:

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right] - \left[ \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right] \right\} \quad (10)$$



**Figura 2.3.** Arreglo tetrapolar Schlumberger simétrico.

donde  $\rho$  es la resistividad del terreno. Por lo tanto, la resistividad de un medio homogéneo se puede determinar de las medidas en la superficie. Si despejamos  $\rho$  de la ecuación anterior, resulta:

$$\rho = \frac{2\pi}{\left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right] - \left[ \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right]} \cdot \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (11)$$

donde  $K$  es llamado el “factor de espaciamento o geométrico” que depende del tipo de dispositivo empleado y viene dada por:

$$K = \frac{2\pi}{\left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right] - \left[ \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right]} \quad (12)$$

En este caso, se empleó el dispositivo tetrapolar colineal Schlumberger Figura 2.3.

Una vez que se obtienen los valores de la corriente  $I$  y del potencial  $\Delta V$  se calcula la resistividad aparente  $\rho_a$  como:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (13)$$

Los instrumentos que miden la resistividad, normalmente dan un valor de la resistencia,  $R = \Delta V / I$ , de esta manera, en la práctica el valor de la resistividad aparente se calcula por la siguiente relación:

$$\rho_a = KR \quad (14)$$

Como se muestra en las ecuaciones anteriores, cuándo la resistencia  $R$  se multiplica por el factor geométrico  $K$ , da el valor de  $\rho$ , la resistividad del terreno. Si el terreno es homogéneo, el valor de  $\rho$  da la resistividad verdadera del medio o terreno. Sin embargo, ya que el subsuelo es multiestratificado, el valor de  $\rho_a$  proporciona lo que se llama el valor de la **resistividad aparente**. Junto con el espaciamiento de electrodos, el valor de la resistividad aparente es una función del espesor y resistividades verdaderos de las capas individuales, la relación entre la resistividad “aparente” y la resistividad “verdadera” es una relación compleja. Para determinar el valor de la resistividad verdadera del subsuelo, a partir de los valores de la resistividad aparente y el espaciamiento eléctrico  $AB/2$ , se emplea el método de inversión de datos de la resistividad aparente (Koefoed, 1979). En la práctica, como la separación de los electrodos actuales se aumenta paso a paso, la corriente penetra y se vuelve más enfocada a mayor profundidad en el terreno. Un gráfico entre la separación actual de electrodos y el valor resultante de la resistividad eléctrica da una curva conocida como curva de **sondeo eléctrico vertical** (para abreviar **SEV**).

### 2.2.2. Dispositivo de medida Schlumberger

En este dispositivo, los electrodos de medida, **M** y **N** se sitúan simétricamente a la distancia  $l$  del punto estación **O**, origen del arreglo. Los electrodos de corriente, **A** y **B**, a la distancia variable,  $L$ , y de forma que los cuatro electrodos queden alineados sobre el terreno (Figura 2.3).

Aplicando la ec.(12) que nos da el factor geométrico  $K$ , resulta:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{L-l} - \frac{1}{L+l}\right) - \left(\frac{1}{L+l} - \frac{1}{L-l}\right)} = \frac{\pi L^2 - l^2}{2l} \quad (15)$$

y el valor de la resistividad aparente para el arreglo Schlumberger se calcula por la siguiente relación:

$$\rho_a = \frac{\pi}{2} \left( \frac{L^2 - l^2}{l} \right) \frac{\Delta V}{I} = KR \quad (16)$$

### 2.3. Flujo de corriente en un medio estratificado horizontal

La cuestión principal en la prospección eléctrica es determinar la profundidad y la resistividad eléctrica de capas horizontales ó casi horizontales. Si se incluye alguna heterogeneidad en el terreno, suponiendo que esté integrado por un número de capas horizontales, cada una representando distintas propiedades eléctricas pero homogéneas e isotropas. El potencial y el campo eléctrico debidos a una fuente puntual de corriente, en cualquier punto sobre la superficie de un medio estratificado se pueden obtener por medio de la integral de Stefanescu. Es decir, debemos ver ahora las soluciones de  $\Delta V = 0$  que satisfacen las condiciones de continuidad con un número de límites horizontales.

Dichas soluciones son calculadas por separación de variables de la ecuación de Laplace en el sistema de coordenadas cilíndricas, cuyo origen está en la fuente puntual **A**, el eje **Z** es vertical y positivo en el sentido hacia abajo, normal a la superficie del terreno (Figura 2.4). Sean **0,1,2, ..., n** el orden de las capas (desde la superficie hacia abajo),  **$h_0, h_1, h_2, \dots, h_n$**  son los espesores de las capas incluyendo el nivel de separación y  **$\rho_0, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$**  las resistividades específicas de las diferentes capas. También  **$H_0, H_1, H_2, \dots, H_n$**  denotan las profundidades de los fondos de cada capa. Sí a la capa superior le corresponde un número cero, espesor  **$h_0$**  y resistividad específica  **$\rho_0$**  respectivamente, los cuales se asocian a la capa del aire.

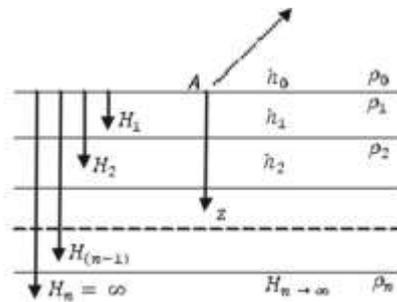


Figura 2.4. Medio Multiestratificado.

Ya que el problema tiene simetría axial con respecto al eje  $z$ , la ecuación diferencial de Laplace que se satisface en cualquier punto, presenta la siguiente forma:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (17)$$

Puesto que el Laplaciano no se anula en el origen, entonces se trata de un problema homogéneo, para el cual hay que encontrar una solución complementaria y una particular, por lo que la solución general requerida de (17), la podemos escribir como:

$$VT(r, \theta, z) = VC(r, \theta, z) + VP(r, \theta, z) \quad (18)$$

La solución complementaria de esta ecuación está formada por la separación de variables, para elegir solamente aquellas que se comportan bien cuando  $r \rightarrow 0$ .

Tomando  $VC = R(r) Z(z)$ , donde  $R$  incluye " $r$ " pero no a " $z$ " y  $Z$  incluye a " $z$ " pero no a " $r$ ". Sustituyendo en (17):

$$Z(z) \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} Z(z) \frac{\partial R(r)}{\partial r} + R(r) \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} = 0 \quad (19)$$

Agrupando adecuadamente, pueden tenerse dos expresiones que van a ser función de una sola variable, siendo iguales entre sí, estas funciones cumplen la condición de que serán iguales a una constante cualquiera, es decir:

$$\frac{1}{Z(z)} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} = \lambda^2 \quad (20)$$

$$\frac{1}{R(r)} \left( \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right) = -\lambda^2 \quad (21)$$

expresiones que tendrán las siguientes soluciones (Koefoed, 1979):

$$Z(z) = e^{\pm \lambda z} \quad (22)$$

$$R(r) = J_0(\lambda r) \quad (23)$$

donde  $J_0$ , es la función de Bessel de 1ª especie y orden cero. Así, cualquier combinación lineal de estas dos expresiones, será una solución general de la ec.(17), por lo que:

$$(A'e^{-\lambda z} + B'e^{\lambda z})J_0(\lambda r) \quad (24)$$

Puesto que  $\lambda$  puede variar en el intervalo  $0 \leq \lambda < \infty$ , entonces la solución general de la ec.(17) habrá que integrarse con respecto a  $\lambda$  en ese intervalo:

$$V(r, z) = \int_0^\infty [A'(\lambda)e^{-\lambda z} + B'(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (25)$$

que representa la perturbación de potencial debido a la presencia de contactos en un medio estratificado.

Como una solución particular, se tomará la más sencilla, que es el potencial producido por una fuente puntual en la superficie de un medio de resistividad  $\rho_1$ , colocada a una distancia R, es decir:

$$V(r, z) = \frac{I\rho_1}{2\pi R} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \frac{1}{(r^2 + z^2)^{1/2}} \quad (26)$$

Si no existen otros límites fuera de la superficie  $z = 0$ , por lo tanto  $A'(\lambda)$  y  $B'(\lambda) = 0$ . Pueden determinarse por las respectivas condiciones de frontera.

Haciendo uso de la integral de Weber-Lipschitz:

$$\frac{1}{(r^2 + z^2)^{1/2}} = \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (27)$$

se puede expresar la solución particular encontrada para el potencial, de la siguiente manera:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda$$

sumando las dos expresiones encontradas para el potencial, la general y la particular, la solución general para la ecuación de Laplace es:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0 d\lambda + \int_0^\infty \{A'(\lambda)e^{-\lambda z} + B'(\lambda)e^{\lambda z}\} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (28)$$

haciendo el siguiente cambio de variables:

$$A'(\lambda) = A(\lambda) \frac{I\rho_z}{2\pi} \quad \text{y} \quad B'(\lambda) = B(\lambda) \frac{I\rho_z}{2\pi}$$

al sustituir en la ec.(28), resulta la siguiente expresión para el potencial:

$$V = \frac{I\rho_z}{2\pi} \int_0^\infty [e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) + (A(\lambda)e^{-\lambda z} + B(\lambda)e^{\lambda z}) J_0(\lambda r)] d\lambda \quad (29)$$

De esta manera, se puede obtener una expresión del potencial total para diferentes estratos, la cual quedaría expresada como:

$$V_i = \frac{I\rho_z}{2\pi} \int_0^\infty [e^{-\lambda z} + A_i(\lambda)e^{-\lambda z} + B_i(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (30)$$

En donde a la expresión entre corchetes se le da el nombre genérico de función núcleo o Kernel. Las constantes  $A_i$  y  $B_i$ , se determinan como se indica a continuación, a partir de las siguientes condiciones de frontera:

1. En el límite tierra-aire, el campo eléctrico no tiene componente normal a la superficie  $z=0$ , ya que el semiespacio superior es aislante, es decir:

$$\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial V_i}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z=0$$

de manera que:

$$\frac{\partial V_i}{\partial z} = \frac{I\rho_z}{2\pi} \int_0^\infty [-\lambda A_1(\lambda)e^{-\lambda z} + \lambda B_1(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (31)$$

expresión en la cual no se incluyó el término de la solución particular, ya que esta cumple claramente la condición. Si evaluamos la ec.(30) para  $z=0$ , entonces:

$$\left. \frac{\partial V_i}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{I\rho_z}{2\pi} \int_0^\infty [B_1(\lambda) - A_1(\lambda)] \lambda J_0(\lambda r) d\lambda = 0 \quad (32)$$

Puesto que la ecuación debe cumplirse para cualquier valor de  $r$ , la componente vertical de la intensidad de corriente del campo perturbador debe ser cero, incluyendo el origen donde se encuentra la fuente, entonces:

$$B_1(\lambda) - A_1(\lambda) = 0$$

y

$$B_1(\lambda) = A_1(\lambda)$$

por lo que:

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} + A_1(\lambda)[e^{\lambda z} + e^{-\lambda z}]J_0(\lambda r)d\lambda \quad (33)$$

2. Para la última capa, el potencial debe ser cero cuando  $z$  tiende al infinito. Así:

$$V_n = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty (e^{-\lambda z} + A_n(\lambda)e^{-\lambda z} + B_n(\lambda)e^{\lambda z})J_0(\lambda r)d\lambda \quad (34)$$

y

$$V_n|_{z=\infty} = 0$$

$$V_n = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty B_n(\lambda)e^{\lambda z}|_{z=0}J_0(\lambda r)d\lambda = 0 \quad (35)$$

Una vez más, la condición debe cumplirse para cualquier valor de  $r$ , por lo que:

$$B_n(\lambda) = 0 \quad (36)$$

y

$$V_n = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty (e^{-\lambda z} + A_n(\lambda)e^{-\lambda z})J_0(\lambda r)d\lambda \quad (37)$$

Para cada límite de separación entre capas, deben cumplirse las siguientes condiciones:

- a) Continuidad del potencial: la cual establece que no habrá saltos bruscos en el potencial al pasar de un medio a otro, es decir:

$$V_i = V_{i-1} \quad \text{cuando } z = H_i \quad (38)$$

- b) Continuidad de la componente normal de la densidad de corriente: la componente normal de la densidad de corriente para  $z = H_i$  será igual, entonces el valor de la diferencia de potencial va a ser el mismo en cada una de las capas, luego se tendrá:

$$\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial V_i}{\partial z} = \frac{1}{\rho_{i+1}} \frac{\partial V_{i+1}}{\partial z} \quad \text{para } z=H_i \quad (39)$$

donde  $H_i$  es el espesor de la  $i$ -ésima capa.

Así tres ecuaciones generales están disponibles, que son: para determinar las tres constantes  $A$ ,  $B$  y  $C$  por las dos condiciones de frontera respectivas, ahora:

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty (e^{-\lambda z} + A_1(\lambda)e^{-\lambda z})J_0(\lambda r)d\lambda$$

$$V_i = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty (e^{-\lambda z} + A_i(\lambda)e^{-\lambda z} + B_i e^{\lambda z})J_0(\lambda r)d\lambda$$

$$V_n = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty (e^{-\lambda z} + A_n(\lambda)e^{-\lambda z})J_0(\lambda r)d\lambda$$

Las cuales consideramos en el análisis para el caso de dos capas, es decir, cuando  $n=2$ . Así:

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty (e^{-\lambda z} + A_1(\lambda)(e^{-\lambda z} + e^{\lambda z}))J_0(\lambda r)d\lambda \quad (40)$$

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty (e^{-\lambda z} + A_2(\lambda)e^{-\lambda z})J_0(\lambda r)d\lambda \quad (41)$$

Aplicando las condiciones de frontera que se deben cumplir en los contactos:

a) Si  $V_1 = V_2$  cuando  $Z = H_1$

entonces,

$$A_1(\lambda)(e^{-\lambda H_1} + e^{\lambda H_1}) = A_2(\lambda)e^{-\lambda H_1} \quad (42)$$

b) Si  $\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial V_1}{\partial z} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial V_2}{\partial z}$  cuando  $z=H_1$

entonces,

$$\rho_2 e^{-\lambda H_1} + \rho_2 A_1(\lambda)(e^{-\lambda H_1} - e^{\lambda H_1}) = \rho_1 e^{\lambda H_1} + \rho_1 A_2(\lambda)e^{-\lambda H_1} \quad (43)$$

Sustituyendo los resultados de (a) en (b) y luego de hacer las simplificaciones algebraicas necesarias, se tiene:

$$K e^{-\lambda H_1} = A_1(\lambda)(e^{\lambda H_1} - K e^{\lambda H_1}) \quad (44)$$

donde,

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (45)$$

Por lo que, finalmente, la constante  $A_1(\lambda)$  quedará determinada por:

$$A_1(\lambda) = \frac{K e^{-\lambda H_1}}{e^{\lambda H_1} - K e^{-\lambda H_1}} = \frac{K e^{-2\lambda H_1}}{1 - K e^{-2\lambda H_1}} \quad (46)$$

Si se sustituye el valor de  $A_1(\lambda)$  en la expresión desarrollada para  $V_1$ , y además se hace  $z=0$ , entonces se tendrá la expresión del potencial en superficie debido a la presencia de dos capas. De esta manera:

$$V_1 = \frac{I \rho_1}{2\pi} \int_0^{\infty} \left[ 1 + 2 \frac{k e^{-\lambda H_1}}{1 - k e^{-\lambda H_1}} \right] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (47)$$

Que es la solución buscada para el potencial en la superficie límite tierra-aire, derivada originalmente por Stefanescu (Stefanescu et.al, 1930). Se aprecia que la función Kernel contiene la información física del modelo, es decir, valores de  $\rho_i$  y  $H_i$ , siendo entonces, una función de estos valores  $K(\rho_i, H_i)$ .

### **2.3.1. Penetración de la corriente**

Un sondeo eléctrico vertical (SEV) se conoce como una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción de corriente.

Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada SEV se representan por medio de una curva, en función de las distancias entre los electrodos. La configuración geométrica Schlumberger en la aplicación del SEV se consigue bajo la condición de

que solo influye una distancia  $AB$  considerándose a la distancia  $MN$  nula frente a la distancia  $AB$ .

En esta caso la resistividad aparente  $\rho_a$  de cada SEV se llevan en ordenadas y en abscisas las distancias  $AB/2=OA$ . Las escalas en ambos ejes se representan por medio de una curva bi-logarítmica conocida como curva de campo ó curva de resistividad aparente.

La finalidad del SEV es averiguar la distribución vertical de resistividad bajo el punto sondeado.

Ahora bien, en prospección eléctrica se requiere de dos tipos de espaciamiento: (1) el espaciamiento entre los electrodos de corriente y (2) el espaciamiento entre los electrodos de potencial. Si se mantiene fija una relación entre estos dos tipos tal como se hace, por ejemplo, con el arreglo Schlumberger, entonces se considera generalmente un aumento en el espaciamiento del arreglo electródico que permitirá mayor penetración de la corriente efectiva que como lo hará un espaciamiento cerrado.

En particular, puede anticiparse que, para que un estrato conductor específico afecte los datos de resistividad superficial, dependerá directamente de la fracción del flujo de corriente total que pasa a través del estrato particular.

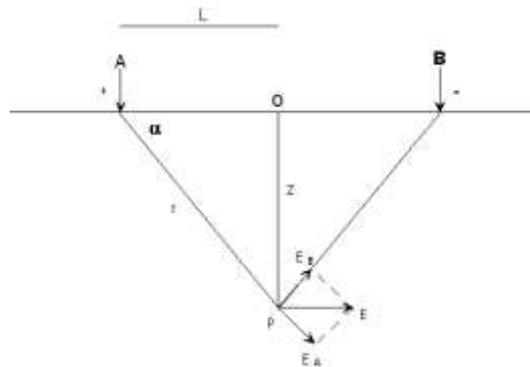
### **2.3.2. Profundidad de investigación de la corriente**

La profundidad de investigación es un concepto físico importante en cualquier método de resistividad con corriente directa en la prospección geofísica y está definida por Evjen (1938), como la profundidad a la cual una capa horizontal delgada (paralela a la superficie del terreno), contribuye al aumento máximo de la medición total de la señal en la superficie del terreno. Por mucho tiempo, en la prospección de resistividad de corriente continua, la profundidad de investigación se ha considerado como un sinónimo de la profundidad de penetración de la corriente. Sin embargo, existe una idea general que para dos electrodos puntuales de corriente separados a una distancia  $L$  en el arreglo Schlumberger, la profundidad efectiva de investigación es igual a  $L = AB/2$  (Roy y Apparao, 1971).

Si sobre la superficie plana de un terreno homogéneo de resistividad  $\rho$  se colocan los electrodos  $A$  y  $B$  simétricamente a lo largo del eje  $x$  con un espaciamiento  $L$  en el

origen (Figura 2.5), se puede calcular la variación de la fracción del flujo de corriente, en función de la profundidad  $z$  en un punto  $P$  ubicado debajo del punto medio  $O$  del segmento **AB**.

Considerando como una carga puntual de magnitud  $\frac{I\rho}{2\pi}$  a cada uno de los electrodos **A** y **B**, el modulo del campo eléctrico producido por cada uno de ellos en el punto **P**, será:



**Figura 2.5.** Distribución de corriente en un medio homogéneo.

$$E_A = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{(L^2+z^2)} \quad (48)$$

$$E_B = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{(L^2+z^2)} \quad (49)$$

de donde  $E_A=E_B$

Debido a que se ha considerado a los electrodos **A** y **B** como cargas puntuales de diferente polaridad, puede verse fácilmente que las componentes  $E_{Ay}$  y  $E_{By}$  se anulan, mientras que las componentes  $E_{Ax}$  y  $E_{Bx}$  son iguales y con mismo sentido generando el campo **E**:

$$\begin{aligned} E &= E_{Ax} + E_{Bx} \\ E &= E_A \cos\alpha + E_B \cos\alpha \\ E &= 2E_A \cos\alpha \\ E &= 2 \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r^2} \cos\alpha \end{aligned}$$

De la Figura 2.5, se puede ver que:

$$\cos\alpha = \frac{L}{r}$$

$$r = (L^2 + z^2)^{1/2}$$

entonces:

$$E = \frac{I\rho}{\pi} \frac{1}{(L^2+z^2)^{3/2}} \quad (50)$$

Si la densidad de corriente  $J_z$  a la profundidad  $z$  está determinada por  $J_z = \frac{E}{\rho}$ . Así:

$$J_z = \frac{I}{\pi} \frac{1}{(L^2+z^2)^{3/2}} = \frac{I}{\pi L^3} \frac{1}{(1+\frac{z^2}{L^2})^{3/2}} \quad (51)$$

De la ec.(51) se puede ver que para un medio homogéneo el valor de  $J_z$  disminuye con el incremento de  $z$ . además, si se considera el desplazamiento de  $\mathbf{P}$  en la dirección perpendicular al plano de la figura, una distancia  $y$ , entonces:

$$J_{z,y} = \frac{I}{\pi L^2} \frac{1}{(1+\frac{z^2+y^2}{L^2})^{3/2}} \quad (52)$$

La fracción de la corriente total  $F$  que fluye entre el plano determinado por la profundidad  $z_0$  y la superficie del terreno, estará determinada por:

$$F = \frac{I}{\pi L^2} \int_0^{z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dydz}{(1+\frac{z^2+y^2}{L^2})^{3/2}} \quad (53)$$

entonces:

$$F = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{z_0}{L} \quad (54)$$

qué, como se esperaba, da la penetración fraccional para la profundidad  $z_0$  en un medio homogéneo (Muskat y Evinger,1941).

En consecuencia, la distribución de la densidad de corriente en el subsuelo es tal que la mayor densidad se encuentra cercana a la superficie y va disminuyendo gradualmente en profundidad. Como se observa en la ec.(54), es evidente que la

distribución de la densidad de corriente con la profundidad depende de la separación eléctrica  $AB$ , ( $L = AB/2$ ).

En consecuencia y dado que la densidad de corriente es proporcional a la corriente introducida, si se pretende explorar a grandes profundidades hay que considerar el introducir una gran cantidad de corriente al terreno. Pero observando el comportamiento de la distribución de corriente, manteniendo fija la profundidad, es evidente que el acceder a ciertas profundidades, es también función del espaciamiento de los electrodos de corriente: a mayor separación es mayor la penetración de la corriente.

#### 2.4. Resistividad aparente

La característica más importante de este concepto es que normaliza los datos y facilita la comparación de los mismos que pudieron haber sido tomados en áreas perfectamente delineadas y bajo una amplia variedad de condiciones. El parámetro más importante en la prospección eléctrica es por tanto el llamado "Resistividad Aparente,  $\rho_a$ ".

Empleando las formulas dadas hasta ahora, podemos calcular la resistividad de un medio semi-infinito homogéneo por medio de cualquier arreglo eléctrico (en nuestro caso el dispositivo (Schlumberger). Para un medio heterogéneo definimos la cantidad de  $\rho_a$ , como la resistividad aparente de una formación geológica igual a la resistividad verdadera de un medio supuesto homogéneo e isótropo en el cual, para el arreglo eléctrico considerado y la intensidad de corriente  $I$ , la diferencia de potencial  $\Delta V$  medida, es igual que para el medio heterogéneo. Es decir, no representa un valor promedio de las  $\rho_n$  ni un valor pesado de ellos.

La resistividad aparente depende de la geometría y de las resistividades de los elementos constituyentes del medio geológico considerado. Así:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (55)$$

donde  $K$  es el factor geométrico con dimensiones de longitud (m). Para el arreglo tetrapolar Schlumberger en un medio homogéneo, el valor de  $K$  esta dado por:

$$K_s = 0.785 \frac{L^2 - l^2}{l} \quad (56)$$

Con lo expuesto hasta el momento, resulta claro ver que el punto principal para el método eléctrico de resistividades es la representación integral de la distribución del potencial con respecto a una fuente puntual colocada en la superficie del terreno de un semiespacio con  $n$  – capas. Se ha visto que para un punto a una distancia  $r$  desde un electrodo puntual, el potencial  $V$  ec.(30) (Stefanescu, 1930), es de la forma:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left( \frac{1}{r} + 2 \int_0^\infty K_n(\lambda, h_i, k_i) J_0(\lambda, r) d\lambda \right) \quad (57)$$

Conocido el potencial en la superficie del terreno, puede deducirse de la solución del problema directo, es decir, dado un corte geoelectrónico estratificado, determinar la curva de resistividades aparentes que se obtendrían sobre él con un dispositivo electrónico determinado.

Para el dispositivo tetraelectrónico Schlumberger, la resistividad aparente viene dada por:

$$\rho_a = \frac{4}{\pi} r^2 \frac{V}{I} \quad (58)$$

que es la misma (12) con un ligero cambio de notación. Ahora bien sustituyendo la ec. (57) en la ec.(58) resulta:

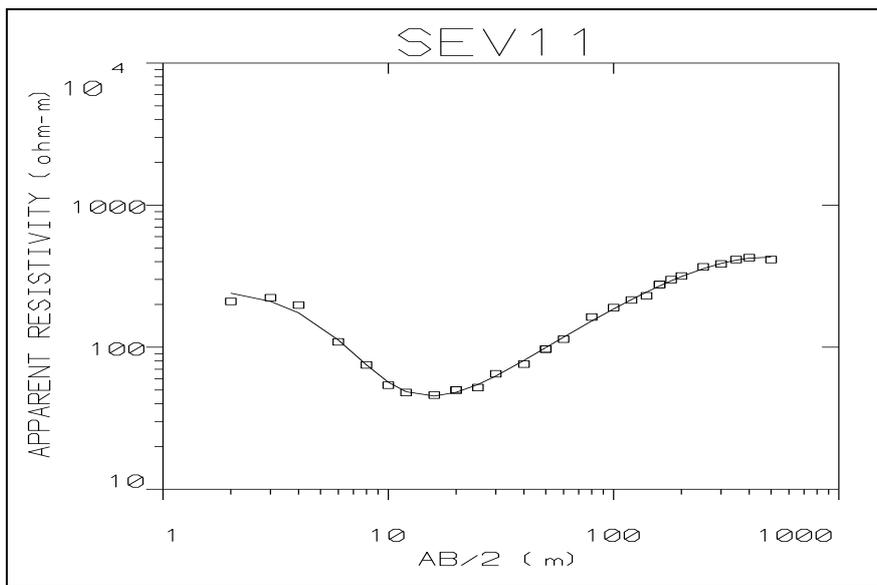
$$\rho_a(r) = \frac{\pi}{4I} r^2 \frac{\partial V}{\partial r} = \rho_1 \left( 1 + 2r^2 \int_0^\infty K_n(m, h_i, k_i) J_0(mr) m dm \right) \quad (59)$$

ya que  $\frac{\partial J_0}{\partial r}(mr) = -mJ_0(mr)$ , donde  $J_0$  es la función de Bessel.

Por lo tanto la ec.(59), es la ecuación más general de la resistividad aparente para el dispositivo tetrapolar colineal Schlumberger. Por lo que las curvas de campo pueden compararse con las curvas teóricas de resistividad aparente basadas en los modelos de dos o tres capas (ver Orellana y Mooney, 1966).

En los SEV, cuando la distancia entre los electrodos se aumenta, la profundidad de la corriente que penetra al subsuelo se incrementa también. En el caso del arreglo tetraelectrónico de Schlumberger simétrico, el incremento de la profundidad de penetración se obtiene a partir del incremento de la longitud de los dipolos. El punto de medición se toma como el punto medio del arreglo de electrodos. Para sondeos a

profundidad, la medición de resistencia ( $\Delta V/I$ ) se realiza a la separación más corta de electrodos y progresivamente a mayores separaciones electrónicas. Para cada separación de electrodos se calcula un valor de resistividad aparente ( $\rho_a$ ) usando la resistencia medida y el factor geométrico apropiado para la configuración de electrodos y la separación que está siendo utilizada. Los valores de resistividad aparente se grafican en una en una “curva de campo” (Figura 2.6). Los ejes X y Y de la gráfica representan los valores logarítmicos de la separación media de los electrodos ( $AB/2$ ) y la resistividad aparente ( $\rho_a$ ) respectivamente.



**Figura 2.6.** Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) que muestra la resistividad aparente en función del espaciamiento medio del dipolo de corriente. Los cuadros representan la curva de campo y la línea continua la curva teórica ó calculada.

La Figura 4.6 muestra un ejemplo de la curva de resistividad aparente,  $\rho_a = \rho_a(\rho_1, \rho_2, \dots, H_1, H_2, \dots, r)$ , que como se ha mencionado, no sólo depende de los datos que especifican el corte considerado, sino del tipo de dispositivo electródico con el que se hayan efectuado las mediciones.

Dicha curva representa gráficamente en escala logarítmica, la solución del problema directo, donde la variable independiente de dichas curvas es el parámetro  $AB/2 = OA$ , que representa la distancia del centro del par **MN** al electrodo **A**, que se designa por **r** en la ec.(10)

En general, la curva de resistividad aparente representa los resultados de un SEV efectuado sobre el corte considerado.

## 2.5. Tipos de curvas características

Como resultado de las formulas teóricas de la resistividad aparente y la utilización de computadoras, diversos autores han dibujado curvas teóricas de  $\rho_a$  para dos, tres y cuatro capas para diferentes casos de resistividades y espesores verdaderos de capas horizontales (figura 2.7).

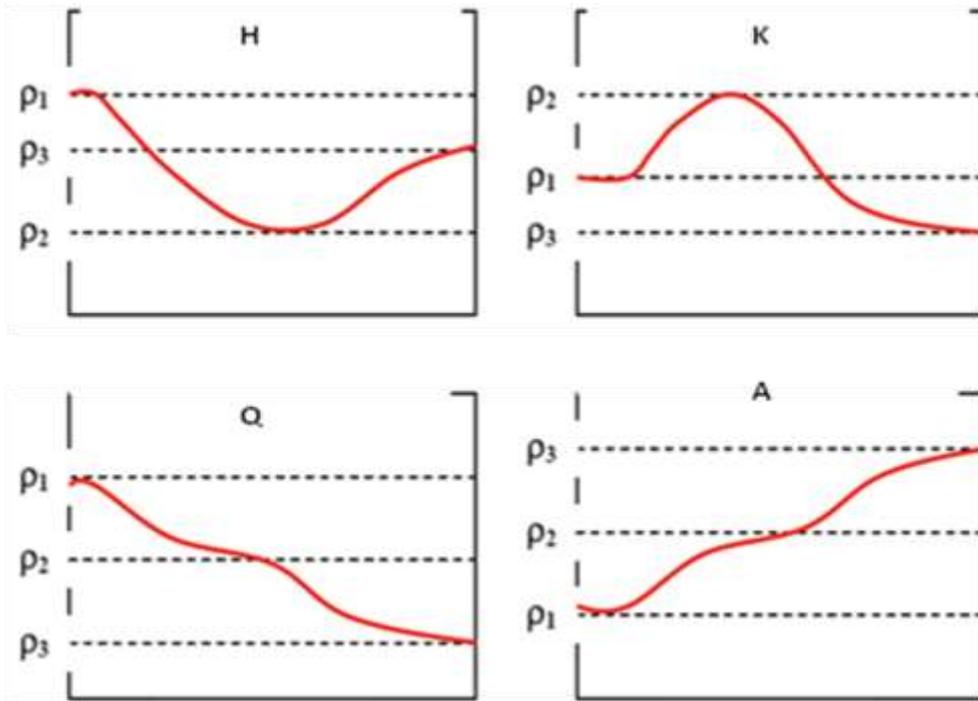
Roman (1934), Monney y Wetzel (1956), Flathe (1963), han publicado cuervas para 2, 3 y/o 4 capas, utilizando escalas logarítmicas, llevando la separación  $AB/2 = OA$  en el eje de las absisas y  $\rho_a$  en el eje de las ordenadas y tomando en la mayoría de los casos un espesor y una resistividad para la primera capa igual la unidad ( $\rho_1=1, h_1=1$ ).

Las curvas teóricas de los SEVs se agrupan por el número de capas de dos, tres, cuatro capas, etc., y luego por las relaciones posibles de las resistividades verdaderas de las capas entre sí, las curvas de tres capas por ejemplo se agrupan en cuatro tipos diferentes (Tabla 2.1).

En el caso de cuatro capas surgen ocho familias de curvas que se denominan con los símbolos:  $HA, HK, QH, QQ, KH, KQ, AA,$  y  $AK$ . En el caso de de cinco capas se observan curvas SEV de 16 tipos en el de 6 capas de 32 tipos, etc.

**Tabla 2.1.** Clasificación de los tipos de curvas a partir de resistividades verdaderas.

<i>Tipo</i>	<i>Relación de resistividades verdaderas</i>
<i>A</i>	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$
<i>H</i>	$\rho_1 > \rho_2; \rho_2 < \rho_3$
<i>K</i>	$\rho_1 < \rho_2; \rho_2 > \rho_3$
<i>Q</i>	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$



**Figura 2.7.** Representación grafica del tipo de curva característica.

# Capítulo 3

---

## 3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 3.1. Localización y descripción del área de estudio

El Valle Pachuca-Tizayuca se localiza en el límite sureste del estado de Hidalgo. Cubre una superficie de 2,850 km<sup>2</sup>, situándose geográficamente entre las coordenadas 19° 47' 30' a 20° 09' de latitud norte y entre los meridianos 98° 40' a 99° 00' de longitud oeste.

La zona de estudio, en función del número de habitantes, está comprende los municipios: Pachuca, Tizayuca, Villa de Tezontepec, Mineral de la Reforma, Zempoala, Tolcayuca y Téllez.

### 3.2. Vías de acceso

En área en estudio se encuentra bien comunicada, tiene como principal vía de acceso, la carretera Federal No. 85, que va de la ciudad de México a Nuevo Laredo-Tamaulipas, las Carreteras Federales 105, 130, 132, comunican al área de estudio con distintas regiones del país (Figura 3.1). Otras vías de comunicación son las carreteras estatales pavimentadas y terracerías transitables.

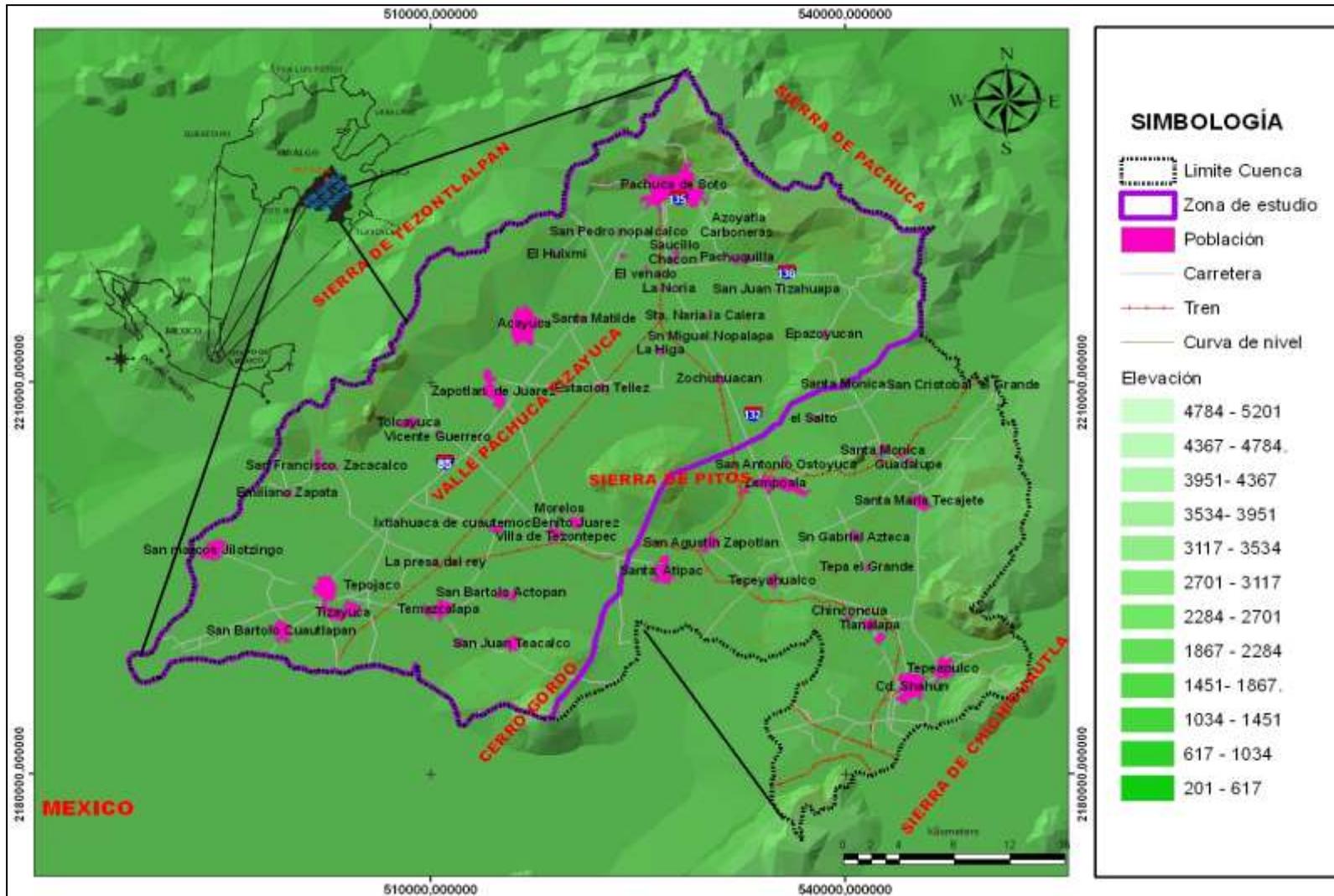


Figura 3.1. Localización del área de estudio.

### **3.3. Fisiografía**

Desde el punto de vista regional, la Subcuenca del Río de las Avenidas se encuentra dentro de la Cuenca de México la cual es de tipo endorreica y pertenece a las planicies escalonadas (Lugo, 1984), que forman parte de las Provincias Fisiográficas que Raíz (1964) definió como, la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico (PFEN). La PFEN se caracteriza por conformar una extensa altiplanicie lacustre con altitud promedio de 2,200 msnm, rodeada por sierras volcánicas, con innumerables abanicos y llanuras aluviales intercaladas por emisiones volcánicas.

La provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, limita al norte con las Provincias Sierra Madre Oriental y Sierra Occidental, al sur con la Provincia Madre del Sur, al este con la vertiente del Golfo de México y al oeste con el Océano Pacífico.

### **3.4. Geomorfología**

Dentro de las formas de relieve de origen endógeno, en el Valle Pachuca-Tizayuca se tienen cadenas montañosas como las Sierras de Tezontlalpan y Pachuca, las elevaciones aisladas del Cerro de los Pitos y una gran cantidad de conos volcánicos pequeños, mesetas y elevaciones de poca extensión asociadas a derrames de lava a lo largo de la Subcuenca del Río de las Avenidas. (THORSA 1991)

Hacia los flancos de los cerros, en la Sierra de Pachuca y Tezontlalpan y en el flanco occidental del Cerro de los Pitos la infiltración de precipitación pluvial se realiza predominantemente a través de fallas. Además de las fallas, las fracturas se encuentran controlando gran parte de la red fluvial, observándose dos orientaciones preferenciales en el sistema de fracturas, que son NE-SW y NW-SE. (THORSA 1991)

De las formas de origen exógeno, originadas del Pleistoceno al Reciente, se presentan: barrancos y valles erosivos. Por otro lado, las formas exógenas acumulativas son los depósitos de pie de monte, planicies aluviales y llanuras de inundación. (THORSA 1991)

Las primeras formas son importantes hidrológicamente, ya que controlan el flujo superficial canalizando hacia las zonas de baja topografía, mientras que las segundas

constituyen zonas de transición y acumulación del agua subterránea formando acuíferos.

### **3.5. Clima**

En el Valle Pachuca-Tizayuca el clima es semiárido con significativa variación en precipitación media anual. La mayoría de las lluvias son del verano a otoño, con el 95% y 5 % en invierno. Los valores de precipitación anual varían de 1500 mm en la Sierra de Pachuca, a 350 mm en áreas de baja topografía. (Huizar, 1993)

Desde el punto de vista climático, la morfología influye en los climas que se presentan en esta área, ya que las elevaciones son verdaderas sombras meteorológicas, como por ejemplo en la Sierra de Pachuca, donde los vientos húmedos chocan, producen precipitaciones y dejan la humedad al lado norte, y pasan al otro lado como vientos secos provocando sequías. (Huizar, 1993)

Los rangos de temperatura media anual varían entre 12 y 18 °C. El mes más frío es enero con temperaturas entre -4 y 12 °C, y el mes más cálido es siempre en mayo con temperaturas entre 22 y 29 °C. (Huizar, 1993)

La oscilación de la temperatura es extremosa en toda el área, con un valor mayor de 15 °C. La evaporación potencial en toda la cuenca es en promedio de 1600 mm. (Huizar, 1993)

### **3.6. Hidrología**

El Valle Pachuca-Tizayuca pertenece a la subcuenca del Río de las Avenidas, se encuentra comprendida en su totalidad dentro de la región hidrológica “Río Pánuco” (No. 26), “Alto Pánuco” (SARH 1973).

Comprende una amplia superficie que se extiende de norte a sur desde el parte aguas de la sierra de Pachuca hasta su unión con el valle de México, en la región de Tizayuca y Zumpango, se caracteriza por su hidrología formada por numerosos arroyos de corta longitud, cuyos escurrimientos fluviales contribuyen lateralmente a la recarga subterránea del valle de Pachuca-Tizayuca, donde están alojados la mayoría de los pozos que abastecen de agua formalmente a las ciudades de México–Pachuca.

Las corrientes fluviales que drenan en el Valle de Pachuca-Tizayuca son escasas y de régimen intermitente, ya que solamente llevan agua durante la época de lluvias, entre ellas se tienen las siguientes (Figura 3.2).

**Río de Las Avenidas.** Es una corriente de tipo torrencial que atraviesa de norte a sur el Valle de Pachuca-Tizayuca, su caudal en la época de lluvias es originado de los escurrimientos que se registran desde el monte de Las Ventanas alrededor de la presa el Jaramillo en la parte alta de la Sierra de Pachuca; y durante el periodo de sequías solamente recibe a su paso aguas residuales de los sistemas de drenaje urbano de Pachuca. (CNA, 2002).

**Río Papalote.** Es una corriente de régimen intermitente que nace de los escurrimientos pluviales que se registran en las laderas de los cerros Santa Ana y Xihuingo en las inmediaciones de Santo Tomás y Tepeapulco; en su trayectoria atraviesa los poblados de Tlanalapa, San Agustín, Villa de Tezontepec e Ixtlahuaca, hasta unirse con el Río de las Avenidas, cerca de la presa el Manantial al oriente de Tizayuca. (CNA, 2002)

**Río Sosa.** Es una corriente tributaria perteneciente al Río de las Avenidas que drena la parte oriente de la ciudad de Pachuca. Su caudal se origina de los escurrimientos pluviales que bajan desde el parte aguas de la Sierra de Pachuca al sur de la población Mineral del Monte, el agua captada fluye sobre pequeños arroyos y cárcavas modeladas por la erosión, que en conjunto integran un patrón de drenaje dendrítico (CNA, 2002).

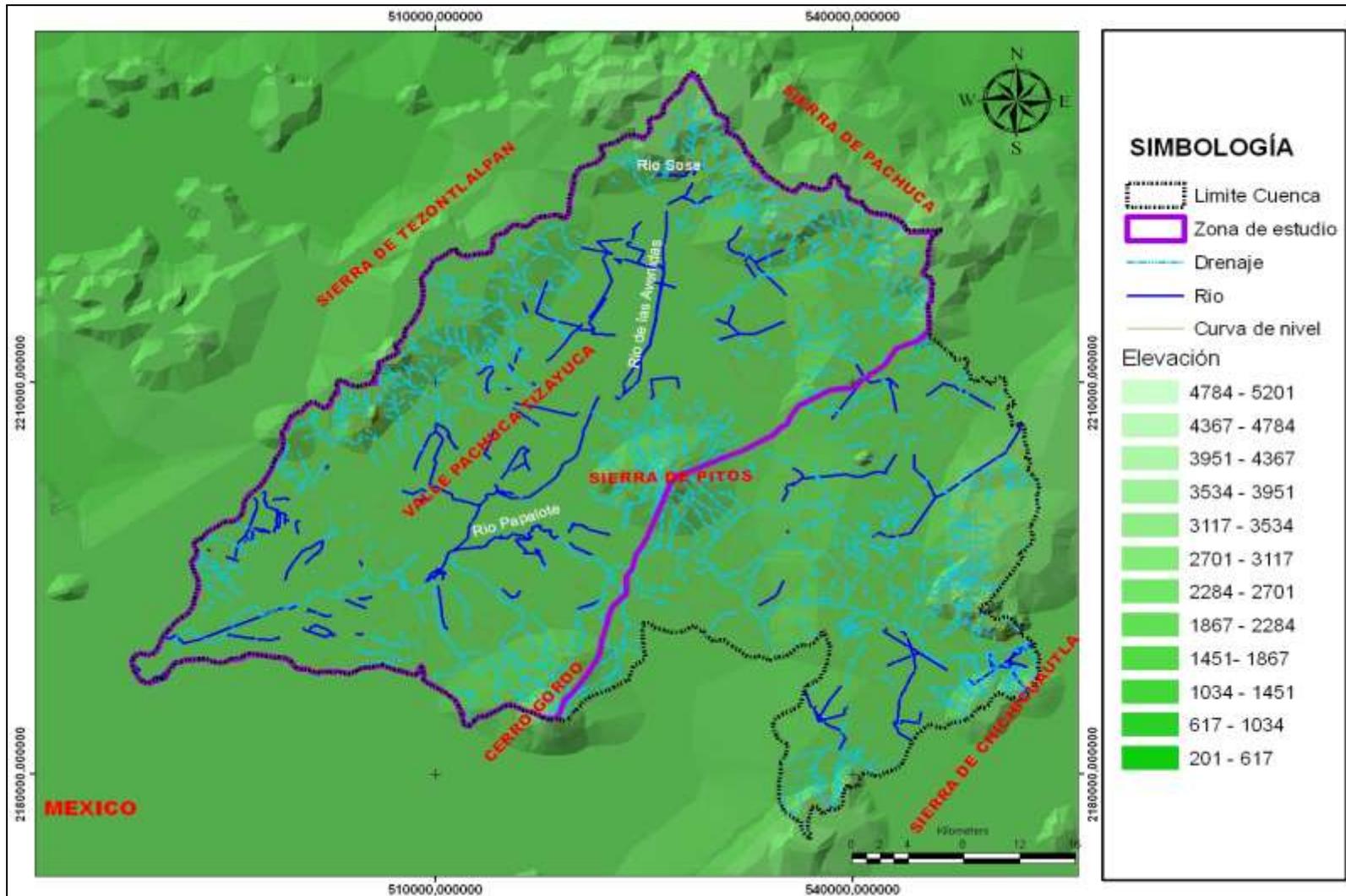


Figura 3.2. Corrientes principales y red de drenaje (Tomado INEGI 1971).

# Capítulo 4

---

## 4. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 4.1. Marco geológico regional

La zona de estudio se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas Terciarias y Cuaternarias de composición y textura variada (brechas, tobas y derrames riolíticos, intermedios y basálticos), las cuales forman en conjunto un extenso y grueso paquete que alcanza varios cientos de metros de espesor. Este conjunto volcánico cubrió a las rocas sedimentarias mesozoicas durante los eventos de vulcanismo del Terciario y parte del Cuaternario (Vázquez-Jaimes, 1989).

Las rocas más antiguas del Terciario Medio afloran en la porción nororiental en la cuenca de México. Fries (1960), reporta unidades volcánicas del Terciario Medio, con una edad de 26 Ma, correspondiente al Oligoceno Tardío. Por otro lado, las andesitas de Zimapán y Pachuca han sido fechados del Mioceno por Cantarel y Robin (1979).

En el Terciario Medio se reconocen, enormes volcanes estratificados, corrientes de lava, tobas, brechas, suelos fósiles, depósitos de lahar y fluviales, este conjunto es cortado por chimeneas volcánicas y diques. A esta edad pertenecen, de acuerdo con Mosser (1962) la base de las Sierras de Guadalupe, el Peñón de los Baños y las traquiandesitas expuestas en la base Oeste del Itztatcihuahatl entre otras.

Después de un lapso de inactividad volcánica, erosión y peneplanización, se inicia nuevamente un ciclo de vulcanismo, con la emisión de lavas acidas, dacitas y riolitas, que forman la base del grupo Pliocénico (Mosser, 1962).

En la región de Pachuca, estas lavas se designan con el nombre de serie Zumate y en la Sierra de Guadalupe se les dio el nombre de serie dacítica Chiquihuite se les ha asignado una edad del Plioceno. En este grupo se incluye por su posición análoga a la

serie de la Sierra Nevada y a la serie andesítica de la Sierra de las Cruces. (Mosser, 1962).

Hace aproximadamente un millón de años se inicia el último ciclo de volcanismo con la serie basáltica Chichinautzin creando el volcán como Cerro Gordo ubicado al Norte de Teotihuacan, además de la barrera volcánica que cerró definitivamente, al sur, la Cuenca de México (Mosser, 1962).

Los sedimentos que se encuentran rellenando la cuenca se clasifican en los siguientes tres grandes grupos:

- 1).- Sedimentos anteriores al volcanismo Mio-Plioceno.
- 2).- Sedimentos contemporáneos al volcanismo Mio-Plioceno.
- 3).- Sedimentos posteriores al volcanismo Mio-Plioceno.

Los primeros corresponden al grupo clástico Balsas-El Morro de edad Eoceno Tardío–Oligoceno Temprano. Los siguientes están asociados a grandes torrentes que deberían haber erosionado y transportado las rocas andesitas desintegradas hacia el centro de la cuenca, rellenándola paulatinamente.

Contemporáneamente la cuenca es subdividida en subcuencas por los aparatos volcánicos, presentándose fuertes erupciones volcánicas que arrojan gran cantidad de materiales piroclásticos, principalmente finos, cubriendo aluviones gruesos.

Nuevas erupciones acompañadas de depósito de materiales piroclásticos se acumularon como facies lacustres en la región central de las depresiones. Como parte final de la actividad volcánica, al sur de la cuenca, se produce una corriente de lava conocida como “El Pedregal” que se extendió hacia la región lacustre de la cuenca de México.

## 4.2. Geología local

La geología superficial se basó en los estudios de Fries (1962), Geyne (1963), Mosser (1975) y De Cserna y colaboradores (1987).

### 4.2.1. Depósitos Terciarios

Se incluyen aquí a las rocas volcánicas y los depósitos piroclásticos de composición variada, cuya edad se considera Oligoceno-Mioceno (Figura 4.1).

La Sierra de Pitos y pequeños afloramientos cerca de Zacacalco están formados por Rocas volcánicas no diferenciadas (Tv), que corresponde a derrames de traquiandesitas y riolita de color gris claro. Estas rocas subyacen a las sedimentos Cretácicos y rocas volcánicas Oligocénicas, se extienden en la planicie y se interdigitan con los depósitos fluviales. Mosser (1975) considera estas rocas como del Terciario Inferior.

**Grupo Pachuca.** Este grupo está formado por rocas volcánicas de diversas edades y de composición variable, sobreyacen discordantemente a las rocas Cretácicas en la Sierra de Pachuca (Geyne et al., 1963). Este grupo comprende una secuencia de ocho formaciones de rocas volcánicas constituidas por estratos interdigitados compuesto por derrames de lava, brecha volcánica, arena tobácea y lahares, con espesor variable en cada formación. Los materiales clásticos existentes fueron depositados por transporte fluvial, pues el límite entre cada formación, por lo general corresponde a un periodo de erosión. Las formaciones que corresponden al Grupo Pachuca son las siguientes:

La unidad basal del grupo es conocida como Formación Santiago (Ts), que contiene principalmente material riolítico, andesítico, dacítico, intercalado en la base; en la cima de la formación existen conglomerados que limitan la Formación Corteza (Tc); la cual consta de derrames de andesita de color negro. Su espesor conocido es de 300 m. Esta unidad es cubierta por la Formación Pachuca (Tp); constituida en la base por piroclastos, derrames de composición andesítica y dacítica; su espesor es de 600 m,

en seguida esta la Formación Real del Monte (Tr); de composición parecida, aquí predominan las brechas en vez de lava, esta unidad aflora en la localidad del mismo nombre, su espesor es de 200 m. Después está la Formación Santa Gertrudis (Tsg), con predominancia de lavas andesíticas de textura porfídica, el espesor es de 350 m. Cubriendo a esta unidad se encuentra la Formación Vizcaína (Tvi), la cual contiene en la base conglomerado en matriz tobácea, brecha volcánica de composición andesítica y dacítica, su espesor es de 600 m. Fue afectada por erosión antes del depósito de la Formación Cerezo (Tce); sobreyacente, constituida por materiales epiclásticos de composición riolítica y riodacítica, su espesor es de 200 m. Esta unidad también sufrió erosión antes de la extravasación de la Formación Tezuantla (Tt). Formada por lavas riolíticas y riodacíticas en espesor de 300 m.

**Formación Zumate (Tz).** Cubre gran parte de la sierra, contiene material clástico en la base seguido de lavas andesíticas; en la cima contiene depósitos de lahar andesítico, su espesor es de 360 m. En la parte oriental de la cuenca, Ledezma (1987) cartografió, cerca de Singuilucan, Hidalgo rocas de composición andesítica color gris claro que intemperiza en color verde, y que en parte está cubierta por derrames de riolita (Andesita el Peñón; Tomvp). Por relaciones estratigráficas la correlaciona con el Grupo Pachuca y le asigna una edad Oligoceno-Mioceno.

#### **4.2.2. Depósitos Plio-Cuaternarios**

Rocas cuya edad probable es Plio-Pleistoceno (De Cserna et al., 1987); se agrupan rocas volcánicas y epiclásticas de composición andesítica a basáltica y son las siguientes:

Riolita Navajas (Tpn). Lavas, brechas y tobas riolíticas intercaladas entre sí. Formación el Cerro de las Navajas cuya edad probable es Pleistoceno Tardío (Geyne et al., 1963).

Rocas volcánicas (TQv). Constituidas por derrames máficos de basalto a dacita que sobreyacen, en discordancia erosional, a las rocas volcánicas anteriores. Estas rocas se distribuyen principalmente en el lado oeste de la zona y constituyen la Sierra de Tolcayuca. Las lavas son más predominantes que los productos volcanoclásticos. Segerstrom (1962), llamo a estas rocas como Formación San Cristóbal y las asigno al

Plioceno Tardío; hacia el interior de la planicie, estas rocas se interdigitan con la Formación Tarango.

**Rocas epiclásticas.** Son sedimentos fluviales depositados en el piedemonte donde forman abanicos aluviales, que se extienden hacia la planicie, y depósitos piroclásticos de caída libre. En esta cuenca se han distinguido tres áreas con variaciones significativas en los depósitos que se mencionan a continuación:

En las Sierra de los Pitos se presentan depósitos de arena fina, limos y tobas arcillosas muy compactas con capas de caliche, además arena gruesa y limos (TQc). Estos sedimentos cubren las rocas volcánicas anteriores.

**La Formación Calpulalpán (Tpc).** Ledezma (1981) llamó así a los depósitos fluviales semejantes a los que existen en la parte oriente de la cuenca en estudio y los correlaciona en edad con la Formación Tarango, del Plioceno Tardío-Pleistoceno (Segerstrom, 1962).

Algunos depósitos donde predominan arenas volcánicas de color negro con espesor y grado de compactación variable, están cubiertas por tobas arcillosas menos compactadas (TQc1).

**Formación Tarango.** Se encuentra representada por material clástico que se acumula rellenando amplios valles. Esta formación fue depositada por corrientes de aguas superficiales que acumularon gravas, arenas, limos y arcillas. Su espesor aproximado es de 400 m (Fries, 1962).

#### **4.2.3. Depósitos Cuaternarios**

**Rocas Volcánicas (Qv).** Son las rocas con mayor extensión en el área, se reconocen derrames de lava y conos cineríticos de composición que varía de basalto de olivino a dacita, se aprecian lavas muy fluidas, en bloque y con estructura masiva. Estas rocas forman el relieve que se extiende al norte y noreste de Tizayuca, se prolonga hasta la

Ciudad de Sahagún y Singuilucan, hacia el noreste en Zempoala existe una topografía de malpaís. Estas rocas se intrerdigitan con el aluvión, (Geyne et al., 1963).

**Aluvión (Qal).** Constituyen la planicie, son materiales granulares que varían de conglomerado a arcilla, hacia la falda de las montañas se observa con gran frecuencia capas de caliche y el aluvión está más cementado. El espesor de aluvión es variable, llegándose a encontrar hasta los 200 m en los tiros de las minas de Pachuca; en los pozos de agua los espesores varían hasta 100 m, (Geyne et al., 1963).

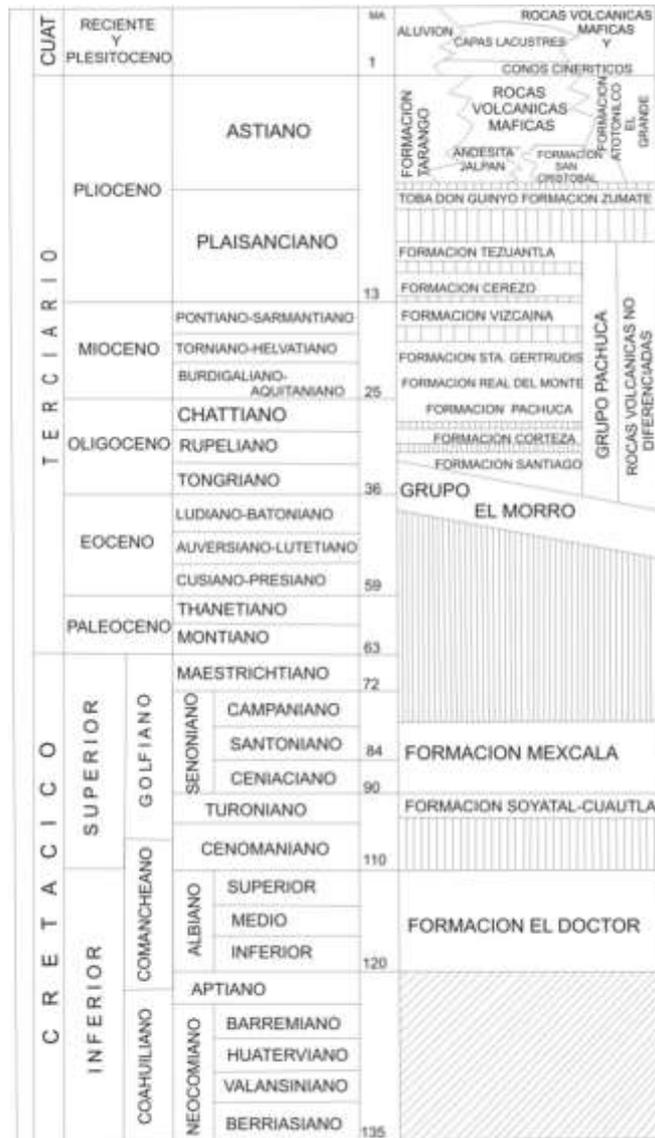
**Lacustres (Q1).** Por condiciones naturales existen en la planicie zonas bajas que presentan inundaciones, donde es común encontrar depósitos lacustres constituidos por arcilla y limos cuyos espesores oscilan de 10 a 100 m, (Geyne et al., 1963).

#### **4.2.4. Rocas intrusivas**

Estas rocas afloran en la Sierra de Pachuca, son numerosos diques de cuerpos irregulares que en superficie presentan longitudes de 4 km y anchura variable de 100 m; en el subsuelo estas dimensiones son mayores. Los diques tienen forma de embudo que se ensanchan hacia arriba, están constituidos por rocas porfídicas de dacita horbléndica (Tph) y pórfidos cuarcíferos (Tpf, Tpg). Los primeros se disponen en dirección oeste-este y los segundos en dirección noreste-suroeste. Estos diques intrusionan en la Sierra de Pachuca hasta la formación el Cerezo, Geyne et al., (1962).

### **4.3. Marco Tectónico**

La condición del relleno del Cuaternario de la Cuenca de México es el resultado del proceso geológico y tectónico que se origina en el Terciario Medio, a mediados del Oligoceno. De acuerdo a los conocimientos actuales, puede fijarse el comienzo de la subducción de la Placa de Cocos en el Pacífico, debajo de la masa continental meridional de México. Este proceso fue el responsable de crear la fosa de Acapulco, dando por resultado la elevada sismicidad del sur de México y, posteriormente el levantamiento de la Mesa Central meridional. La placa al hundirse hasta la profundidad de 100 km aproximadamente en el manto superior, produjo una primera faja volcánica,



**Figura 4.1.** Columna litoestratigráfica del Valle Pachuca-Tizayuca (Modificado de Vázquez –Jaimes,1989)

representada entre otras por las rocas de Temascaltepec, Taxco, Iguala y posiblemente Oaxaca, (Marín 1987).

Posteriormente, al producirse un cambio en el ángulo de subducción, la fusión de la placa produjo a partir del Mioceno Medio, originándose en Plioceno-Cuaternario las rocas que forman el Eje Neovolcánico. La Cuenca de México comprendida entre la porción central del Eje Neovolcánico, se conjuga como una provincia de alto riesgo sísmico donde interactúan varios factores geológicos. Por un lado la actividad sísmica y por otro su sistema de fallas y fracturas, activas que forman un sistema de fosas y pilares. Las fosas están azolvadas con espesores potentes de sedimentos lacustre con derrames de lava piroclásticos.

Dentro de la cuenca se manifiestan altas estructuras y depresiones locales a diferentes niveles estratigráficos, originados por la influencia regional de fallas y fracturas con orientación noroeste-suroeste y noreste-sureste por efectos compresivos que la Placa de Cocos ejerce con el Eje Neovolcánico.

Las principales estructuras de la cuenca son los conjuntos de volcanes que se disponen en dirección noreste-suroeste y este-oeste. Estas estructuras corresponden con fracturas y fallas de edad Terciaria y Cuaternaria por las cuales se desarrolló el volcanismo que desarrolló estos relieves (Figura 4.2).

La topografía presenta un escalonamiento hacia la planicie, que parece corresponder con fallas verticales cuya orientación es noreste-suroeste y son afectadas por un sistema de fracturas de dirección norte-sur y noroeste-sureste. Los escalones en la topografía permiten suponer, que la planicie constituye una fosa tectónica delimitada por este relieve. La Sierra de Pitos puede ejemplificar esto, pues su vertiente poniente se trunca en línea recta de dirección norte-sur; la Sierra de Tolcayuca presenta también algunos escalones en dirección noreste-suroeste hacia la planicie (Marín, 1986).

De Cserna *et al.* (1987) al analizar el campo volcánico de Tizayuca señalan la presencia de fracturas extensionales de cizalleo con orientación NE-SW, afectando a esta Sierra.

Marín (1990), por otra parte presenta un enjambre de fallas distensionales también de orientación NE-SW, comunicadas con otras direcciones noreste-suroeste. Dicho autor asocia la generación de estas fallas a la existencia de dos ejes distensivos que afectan a la Cuenca de México, Apaxco-Izúcar y Actopan-Apizaco, respectivamente.

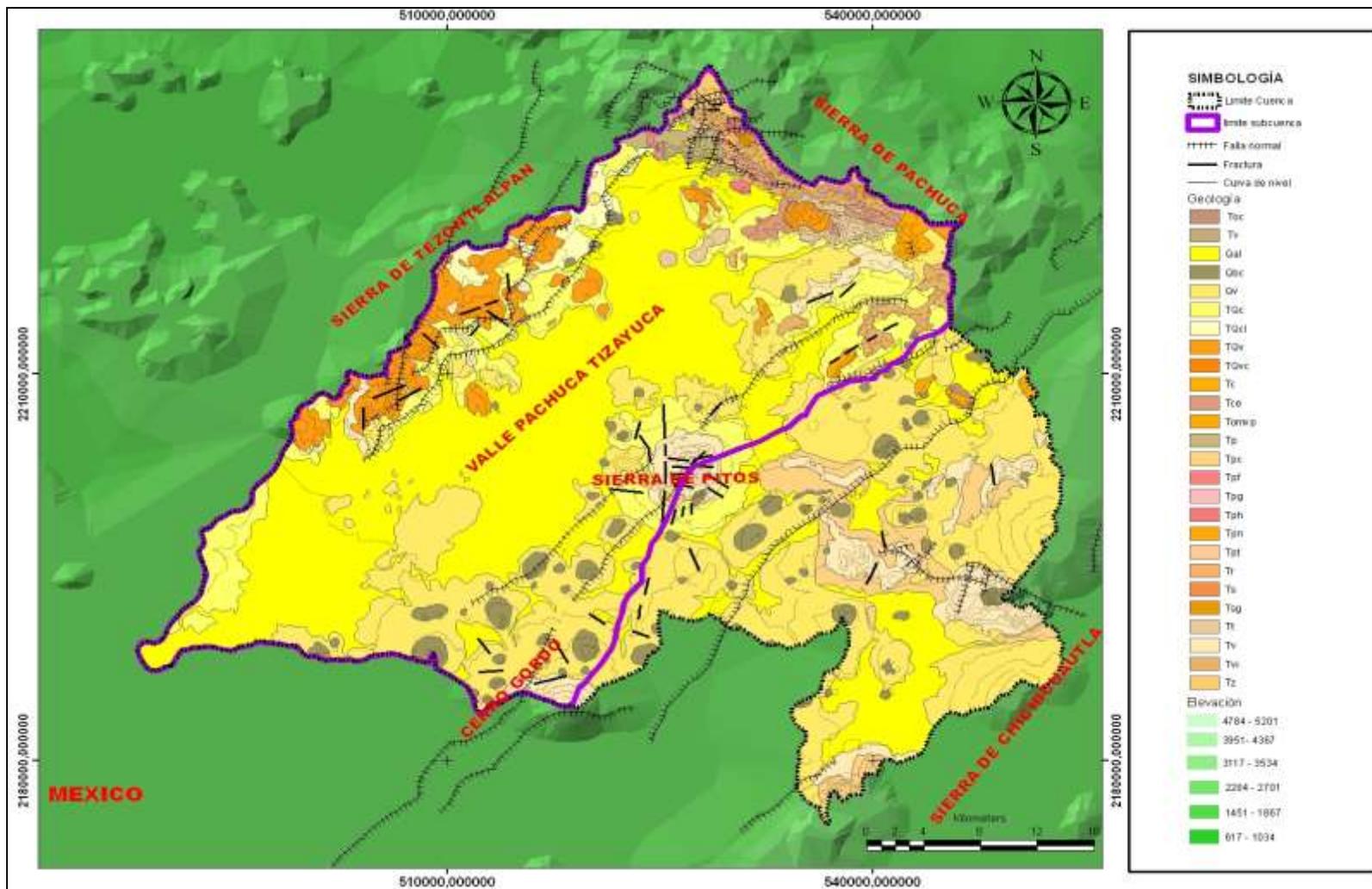


Figura 4.2. Mapa geológico de la Subcuenca Río de las Avenidas (Modificado de Mooser 1975).

# Capítulo 5

---

## 5. ASOCIACIÓN DE LA RESPUESTA GEOELÉCTRICA CON LA LITOLOGÍA DEL SUBSUELO

### 5.1. Método de operación en campo

Los valores de resistividad de una roca están determinados más que por su composición mineralógica, granulometría, cantidad y calidad del agua de formación, fundamentalmente por la porosidad, conductividad hidráulica y por la salinidad del agua. Todo esto hace que la resistividad de cada tipo de roca presente una gran variación. Contrastes significativos de la resistividad eléctrica se presentan entre formaciones secas y saturadas con agua y formaciones con agua dulce y agua salobre o salina. Arenas de varios tamaños de grano, arcillas, granitos y gneises alterados y fracturados, areniscas, calizas cavernosas, basaltos vesiculares, etc., todos tienen intervalos de resistividad definidos pero sobreponiendo intervalos. Los intervalos son generalizados y pueden variar significativamente con base a las condiciones hidrogeológicas locales.

En general, en campo encontraremos los valores que se aproximen a los intervalos de resistividad que se muestran en la Tabla 5.1 para diferentes minerales y rocas comunes. La resistividad de materiales geológicos presenta uno de los rangos de variación mayores que cualquier otra propiedad física, la cual va desde  $1.6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$  para la plata hasta  $10^{16} \Omega\text{m}$  para azufre puro. Las rocas ígneas tienden a tener las resistividades más altas; las rocas sedimentarias tienden a ser las más conductivas; las rocas metamórficas suelen tener resistividades intermedias pero con ocasionales valores extremos. La edad de las rocas también suele ser importante: una roca volcánica Cuaternaria puede tener una resistividad de entre 10 y 200  $\Omega\text{m}$  mientras que una roca equivalente del Precámbrico puede tener una resistividad de magnitud mayor. Esto es una consecuencia de que la roca más antigua tiene más tiempo expuesta al relleno secundario de intersticios por procesos de mineralización y compactación con la consecuente reducción en la porosidad y permeabilidad.

**Tabla 5.1.** Resistividades comunes de rocas y/o materiales y agua (Orellana y Money 1996).

ROCA/MINERAL/MATERIAL/AGUA	RESISTIVIDAD $\Omega - m$
ARCILLAS	1 - 20
ARENAS	50 – 500
ARENISCAS	50 - 5,000
ARENAS Y GRAVAS SECAS	1,000 -10,000
ARENAS Y GRAVAS CON AGUA DULCE	50 – 500
ARENAS Y GRAVAS CON AGUA DULCE	50 – 500
ARENAS Y GRAVAS CON AGUA SALADA	0.5 – 5
ARENAS ARCILLOSAS	50 – 300
ARENAS DE CUARZO	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
BRECHA VOLCÁNICA	100 – 2000
ESQUISTOS GRAFITOSOS	0.5 – 5
ESQUISTOS ARCILLOSOS O ALTERADOS	100 – 300
ESQUISTOS 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
BASALTOS	300 - 10,000
LIMOS	30 – 500
MARGAS	50 - 5,000
PIZARRAS	100 - 1,000
TOBAS VOLCÁNICAS	20 – 100

En una región determinada, la geología, interpretación e integración adecuada de la geofísica aunado a la experiencia nos indicará, qué valores concretos de resistividad presenta cada una de las formaciones, en otras ocasiones estos valores pueden obtenerse al realizar un SEV en un punto donde exista una perforación de la que conozcamos la columna litológica lo cual llamaremos “SEV paramétrico”, que es lo

más correcto y recomendable, con la desventaja de que en la mayoría de los estudios no existen los datos del corte o en su caso no hay perforación.

Es importante tener en cuenta que en materiales granulares la resistividad aumenta con el tamaño del grano; en una investigación hidrogeológica, buscaremos resistividades elevadas que indican la presencia de materiales gruesos con alta conductividad hidráulica.

En rocas compactas buscaremos las resistividades más bajas, que indican que la zona de formación presenta la mayor fracturación y/o alteración. En este caso, también puede ser que las zonas de menor conductividad tampoco sean permeables si los planos de fractura han sido rellenados por arcillas producto de la alteración.

## 5.2. Equipo empleado

Para la toma de datos en la prospección realizada, se uso un equipo conocido como resistivímetro de corriente continua modelo “BISON-2350B” de la marca Geometrics Inc., (Figura 5.1), cuyas características son: voltaje de 720 V, frecuencia nominal de 11 Hz, corriente nominal a 28 mA, resolución de  $\pm 2\%$  de acuerdo al rango de resistividades, cinco rangos de escala (0.001, 0.01, 0.1, 1.0 y 10) para cubrir todos los tipos de materiales subterráneos, portátil y ligero. El resistivímetro permite filtrar el potencial espontaneo del terreno y es posible medir la resistencia eléctrica ( $R = \frac{\Delta V}{I}$ ), debida a la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) generada por la corriente alimentada ( $I$ ).



**Figura 5.1.** Equipo BISON-2350B usado en campo.

El resistivímetro consiste de una unidad básica y su sistema contiene como generador de corriente una batería adaptada a la base del equipo. El voltímetro y el amperímetro se encuentran integrados en la misma unidad (Figura 5.1).

Los accesorios del equipo incluyen cuatro carretes de cables con base aislada de 100 y 500 m de cable conductor sencillo aislado, cable delgado de baja resistencia eléctrica, dos barras de acero inoxidable que funcionan como electrodos de corriente y dos barras de acero inoxidable recubierto con cobre como electrodos de potencial, martillos, una batería recargable de repuesto y radio transmisores para comunicar los cambios de las estaciones hacia ambos extremos desde el centro del arreglo donde se encuentra el equipo.

### 5.3. Levantamiento geoelectrico

Para ubicar los sitios donde se realizaron 31 SEVs, fue necesario recorrer el área y apoyados con un GPS map60CSx, marca Garmin, se ubicaron los sitios de los sondeos y se distribuyeron en la zona de interés a lo largo de 9 perfiles geoelectricos usando como referencia las coordenadas UTM en el sistema WGS 84 (ver Tabla 5.2). La ubicación de los sondeos se muestra en la Figura 5.2

**Tabla 5.2.** Coordenadas de los Sevs efectuados en el área de estudio.

SEV	X	Y	ALTITUD MSNM
SEV1	2209429	521648	2352
SEV2	2208646	520975	185
SEV3	2207915	520372	735
SEV4	2207163	519744	2341
SEV5	2206430	519112	2334
SEV6	2212717	529902	2341
SEV7	2211092	529832	2353
SEV8	2217079	526304	2345
SEV9	2216514	526320	2324
SEV10	2214475	524815	2343
SEV11	2215034	523817	2345
SEV12	2215506	522998	2345
SEV13	2212418	519538	2345

SEV14	2212128	520005	2343
SEV15	2211874	520430	2343
SEV16	2211423	520902	2338
SEV17	2211150	518175	2356
SEV18	2210607	518955	2347
SEV19	2210246	519460	2336
SEV20	2209733	520195	2339
SEV21	2209156	520877	2355
SEV22	2209030	516342	2358
SEV23	2208870	517183	2342
SEV24	2208717	518111	2345
SEV25	2208546	519040	2330
SEV26	2204670	513254	2326
SEV27	2204221	513830	2328
SEV28	2203809	514467	2323
SEV29	2199339	518228	2319
SEV30	2200324	517981	2327
SEV31	2201306	517704	2320

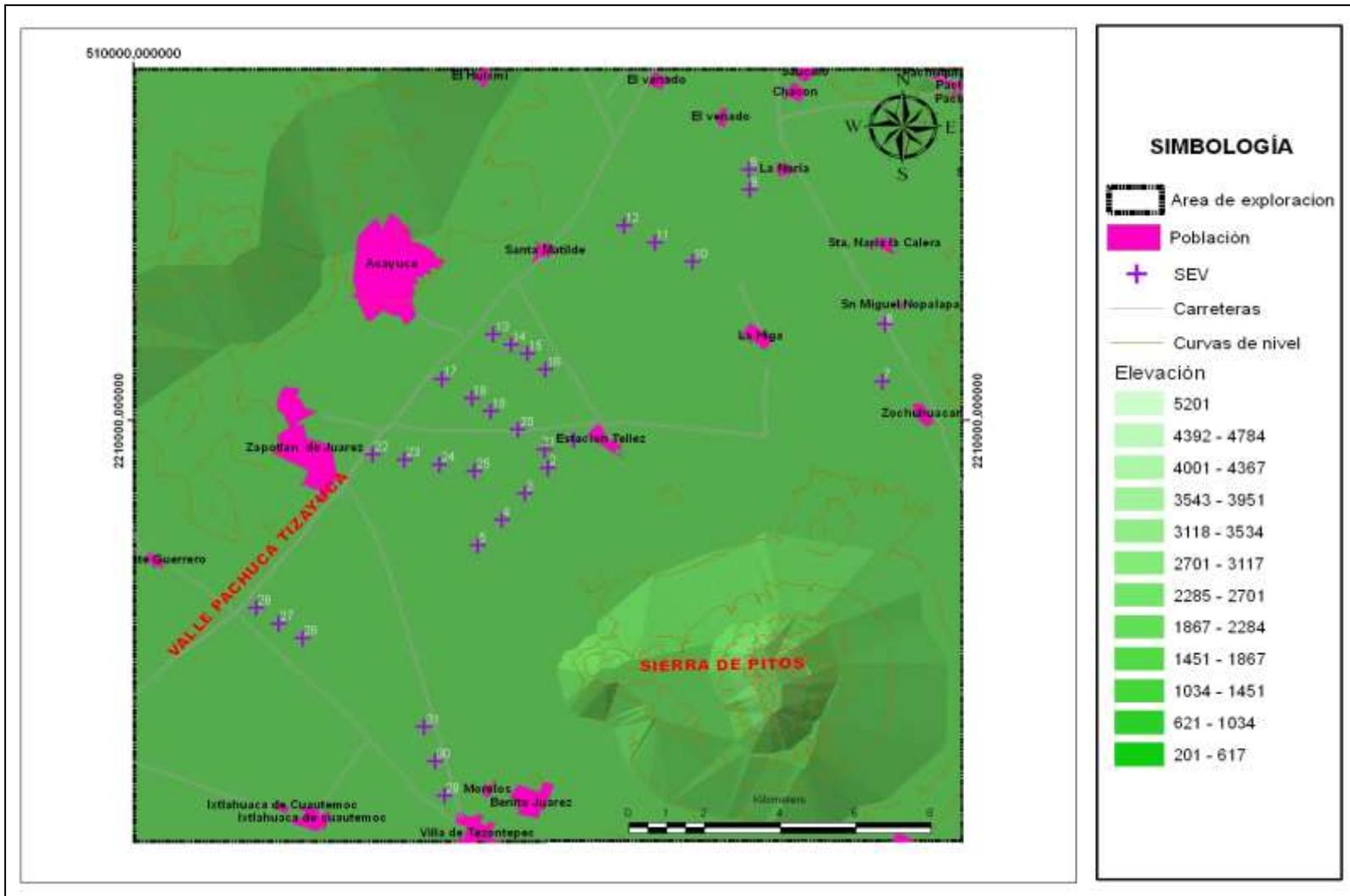


Figura 5.2. Distribución de los SEVs en el área de estudio.

# Capítulo 6

---

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

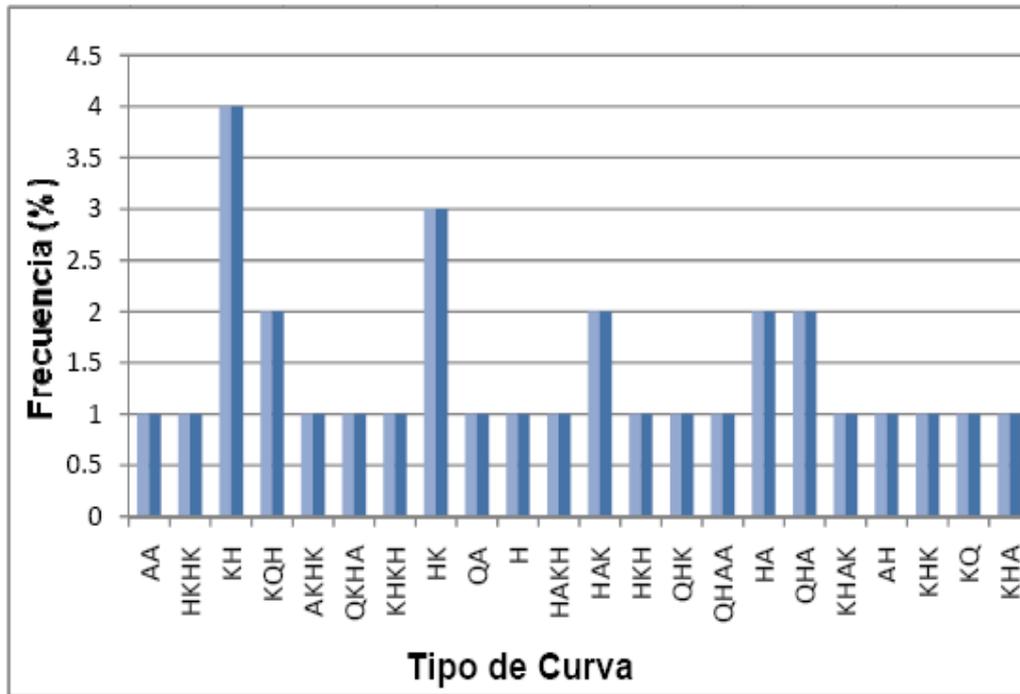
### 6.1. Procesamiento de datos geoelectricos

Desde la captura en campo se inicia el procedimiento de interpretación, con las mediciones de los valores de la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) y la corriente inyectada ( $I$ ), se calcula el valor de la resistividad aparente ( $\rho_a$ ). Estos valores obtenidos “*in situ*” son graficados con el objeto de observar las tendencias de la curva de campo, su morfología muestra si las lecturas son correctas, o si es necesario modificar algún criterio en la planeación del trabajo de campo.

#### 6.1.1. Interpretación de curvas de resistividad aparente

Para cada sondeo eléctrico, a partir de los valores del potencial medido y de las lecturas de corriente inyectada, se graficaron los valores calculados de resistividad  $\rho$  contra la distancia  $AB/2$  (m) en papel doblelogarítmico (ver apéndice A), resultando la curva de resistividad aparente,  $\rho_a$  (Ohm-m).

Posteriormente, como se indicó en la metodología, se agruparon los SEVs de acuerdo a la morfología de las curvas de resistividad aparente para facilitar el proceso de interpretación (Figura 6.1). A partir de la forma de la curva de campo fue posible estimar el número mínimo de capas horizontales en el subsuelo y la magnitud relativa de la resistividad de las capas respectivas



**Figura 6.1.** Tipo de curva teórica para diferentes modelos de capas en el área de estudio.

En la zona de estudio se encontró la dominancia de curvas del tipo KH en un 40 %, HK en un 30 % y KQH, HAK, HA, QHA en un 20 %, el resto de las curvas se manifestaron por un 10 % (AA, HKHK, AKHK, QKHA, KHKH, HKH, QHK, QHAA, KHAK, AH, KHK, KQ, KHA).

En la Figura 6.2 se ubican las familias obtenidas mediante la interpretación cualitativa de los SEVs. Se configuro la existencia de 6 dominios. El primer dominio se caracteriza por curvas de la familia KH SEV (3, 7, 8, 10), su configuración presenta una forma irregular ubicada en la parte noroeste de la Sierra de Pitos y se extiende hacia el sur asociándose a un cuerpo con característica tabular con rumbo SW.

El segundo dominio en importancia por el número de SEV (11, 2, 31), constituido por curvas del tipo HK se ubica en la parte centro oriental de la zona de estudio y se extiende de norte a sur con rumbo NW-SW, presenta una forma alargada.

El tercer dominio está constituido por curvas KQH SEV (4, 30), se ubica en la parte oriental de la zona de estudio se extiende en forma alargada de norte a sur con un rumbo NE-SW.

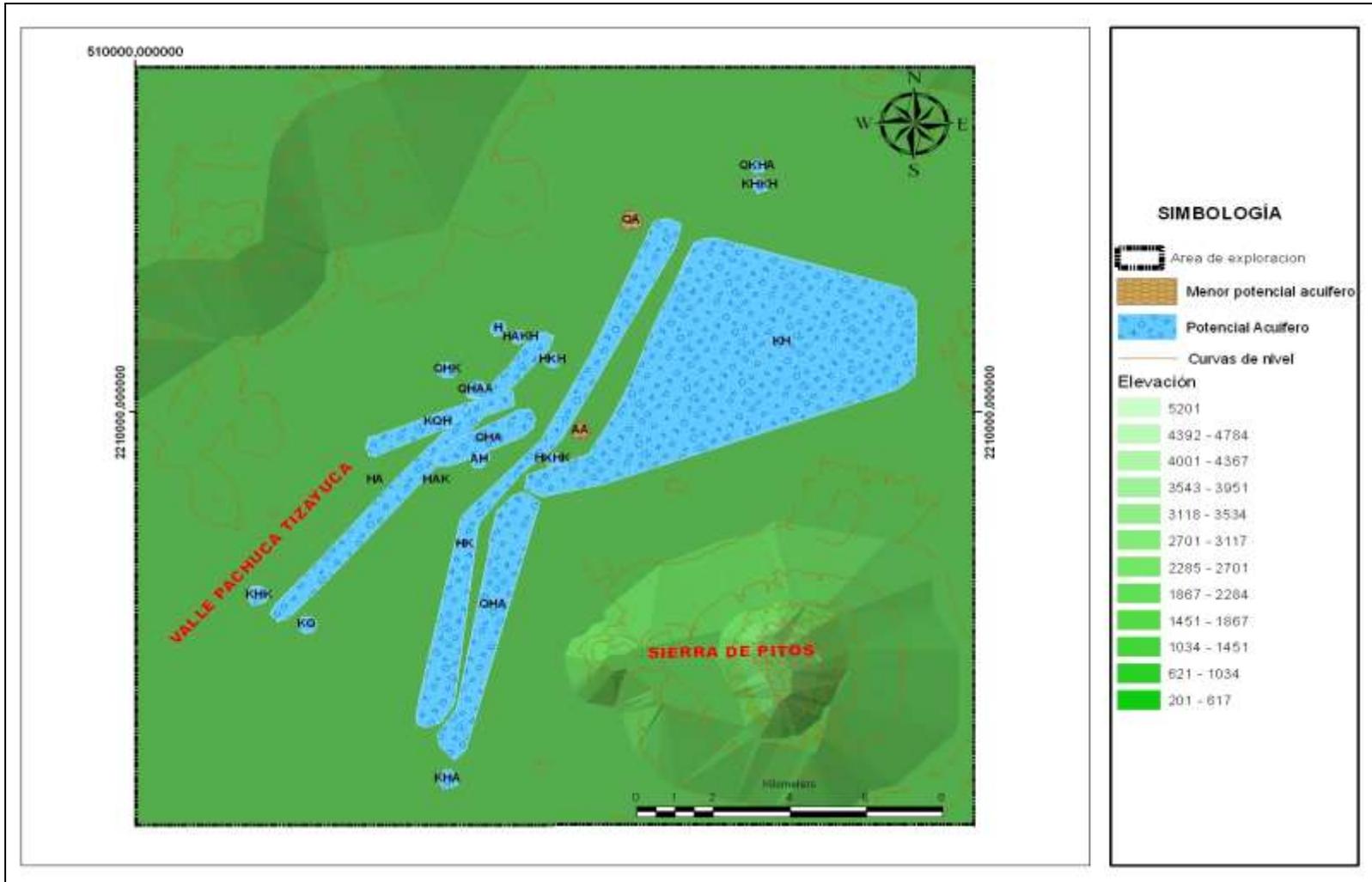
El cuarto dominio se ubica al occidente de la Sierra de Pitos, representado por la familia de curvas del tipo HAK SEV (15, 27), se extiende de norte a sur en forma alargada con rumbo NE-SW.

El quinto dominio está constituido por curvas del tipo QHA SEV (24, 20), se ubica en la parte central del valle con un rumbo NE-SW.

El sexto dominio se encuentra constituido por curvas del tipo HA SEV (22,19), se ubica en la parte central del valle se extiende en forma alargada de norte a sur con un rumbo NE-SW.

En cuanto a los dominios 1, 2, 3, 4, 5 y 6 de acuerdo a su morfología, reflejan un contraste resistivo, que se interpreta como una asociación por la presencia de humedad, que en la exploración de agua subterránea, estas zonas pueden presentar un buen potencial acuífero.

El resto de las curvas se presentaron minoritariamente, esto no quiere decir que no sean de buen potencial acuífero.



**Figura 6.2.** El mapa muestra la distribución de los tipos de curvas de los SEVs en el área de estudio, los dominios en función de la familia de curvas y las zonas de potencial acuífero.

**Tabla. 6.1.** Parámetros geoelectrónicos y tipo de curva en el área de estudio.

SEV No.	Capa 1		Capa 2		Capa 3		Capa 4		Capa 5		Capa 6		CURVA
	1	h1	2	h2	3	h3	4	h4	5	h5	6	h6	
SEV1	245.38	2.03	733	0.91	530	53.87	4124	END					AA
SEV2	486.1	1.18	57.1	2.3	8000	3.18	84.62	17.34	1179	29.21	94.04	END	HKHK
SEV3	20.2	0.53	2377	10.13	46.42	17.78	4010	END					KH
SEV4	167.75	1.68	2063	0.76	1474.7	4.58	546	11.62	933.7	END			KQH
SEV5	87.9	3.1	299.	1.31	2744.2	6.16	32.7	8.07	2834	54.78	13.53	END	AKHK
SEV6	30.70	0.97	1243	2.24	484.31	53.86	1082	END					KH
SEV7	59.52	4.67	377.61	4.28	118.71	33.24	872	END					KH
SEV8	72.86	1.10	25.12	1.80	776.79	5.78	34.64	8.24	2498.5	18.96	682.6	END	QKHA
SEV9	27.37	3.1	128.03	1.31	19.37	6.16	172	8.07	55.29	54.78	6532	END	KHKH
SEV10	10.22	0.64	2227	4.41	74.4	29.54	8495	END					KH
SEV11	258.5	2.47	34.9	16.51	4060	37.63	1603	END					HK
SEV12	314.9	1.77	32.4	11.8	50	37.6	5439.3	END					QA
SEV13	868,8	1.23	142.4	94.8	3181	END							H
SEV14	172.7	1.35	95.4	9.7	655.2	22.4	1325.1	35.5	182.7	98.5	7113	END	HAKH
SEV15	2194.6	0.61	123.5	6.46	200.4	37.2	2154	5.1	1082	END			HAK
SEV16	300.1	1.19	109.8	7.73	1431	73.9	151	68.3	1837	END			HKH
SEV17	616.7	1.9	337.5	2,3	135.6	24.6	8524	12.8	2936	END			QHK
SEV18	794.1	0.98	198.5	5.73	97	28.4	228	11.1	1179	109.61	6640	END	QHAA
SEV19	439.3	2.44	54.4	14.7	322.7	54.8	3351	END					HA
SEV20	551.5	0.76	217.2	3.70	86.9	27.1	812.2	236.8	6609	END			QHA
SEV21	703	2.43	195.7	27.3	2555	25.4	626.1	END					HK
SEV22	873.4	1.15	241.7	36.02	3255	160.2	8471	END					HA
SEV23	32.62	1.4	3468.5	1.2	193.5	11.78	2651.7	28.65	342.03	65.84	5801	END	KHAK
SEV24	634.35	0.87	319.11	4.36	141.36	16.1	1131	60.9	6495	END			QHA
SEV25	272.57	3.57	163.71	27.09	46.35	3.08	5547	END					AH
SEV26	10.44	0.74	231.81	0.73	116.05	23	118.1	68.62	2942	END			KHK
SEV27	369.	1.14	111.6	13.91	175.7	23.25	1407	54.66	376.6	END			HAK
SEV28	1455	1.83	2518	11.23	202.2	185.9	113.4	END					KQ
SEV29	59	1.07	1002	3.54	41.69	12.72	1265	93.47	1622	END			KHA
SEV30	145.41	5.06	290.5	13.65	56.33	33.15	32.07	182.3	3242	END			KQH
SEV31	149.9	2.54	82.10	79.56	8354	192.85	48	END					HK

### **6.1.2. Mapas de resistividad aparente**

El trabajo de gabinete continuo con la interpretación cualitativa construyendo perfiles o pseudosecciones de iso-resistividad aparente para estimar el comportamiento y/o tendencias geoelectricas de cada perfil.

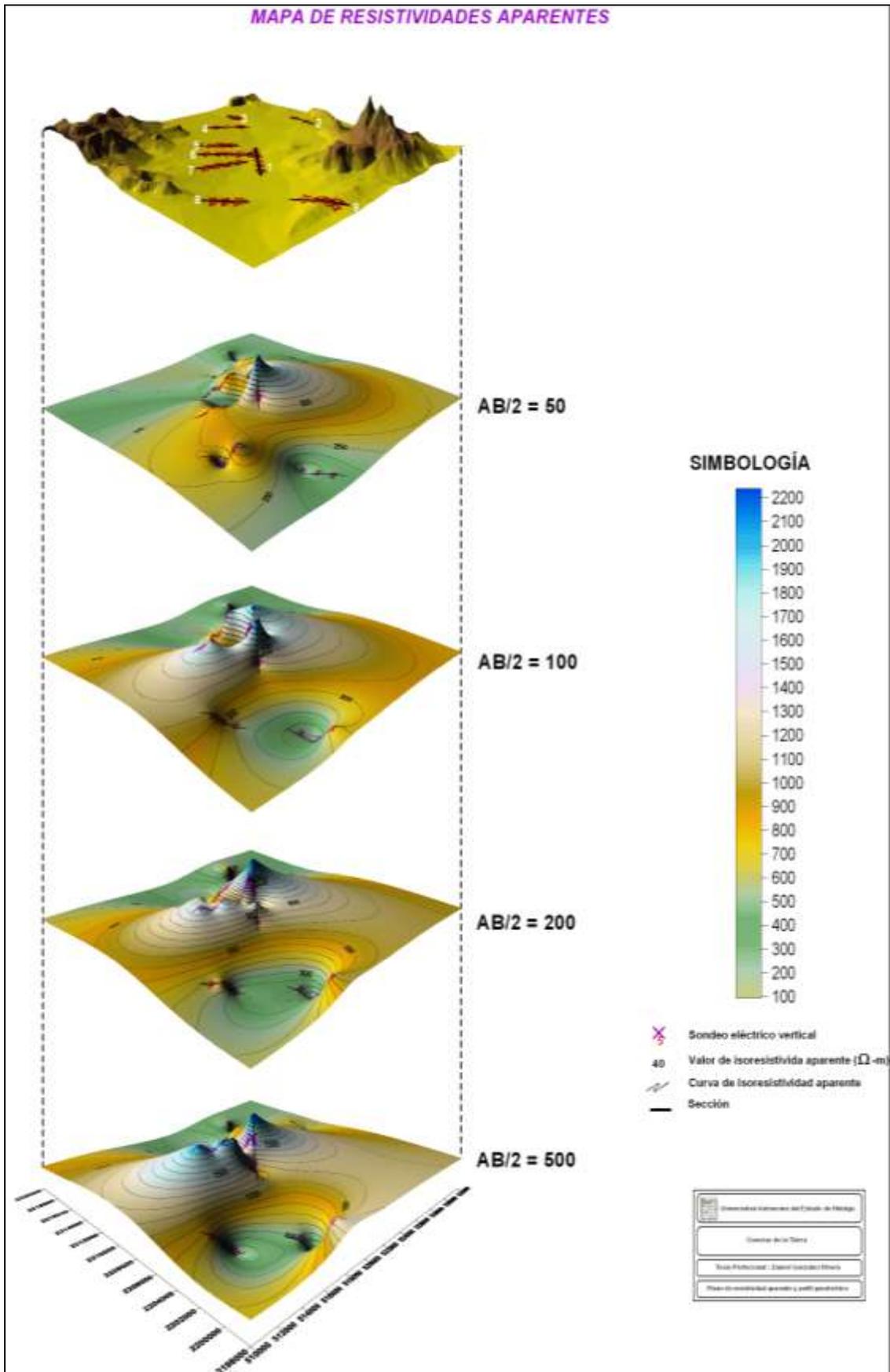
Estos perfiles dan una imagen general de la distribución de máximos y mínimos de cambios resistivos y conductivos, respectivamente. Esta interpretación se realizó configurando los datos de resistividad aparente en función de la separación interelectrónica, en este caso se utilizó el programa Surfer 8 (Golden Software Inc., 2002), para realizar las configuraciones y así obtener la sección de iso-resistividad aparente.

Con los valores de resistividad aparente, curvas de campo, de los 31 sondeos para las 9 secciones se generaron mapas de iso-resistividad aparente para las aberturas  $AB/2$  igual a 50, 100, 200 y 500 m.

En la Figura 6. 3 se muestra de manera general la distribución lateral de la resistividad aparente en el área de estudio para las aberturas indicadas. Estas aberturas en  $AB/2$  se seleccionaron en función de los contrastes resistivos de los SEVs tratando de rastrear continuidad de paquetes críticos en resistividad aparente.

La confección de las aberturas  $AB/2$  a 50, 100, 200 y 500 m, se observan contrastes resistivos entre las coordenadas UTM (5,10000, 21,98000) de longitud oeste y (5,32000, 22,20000) de latitud norte.

En la configuración de  $\rho_a$  para una abertura  $AB/2$  igual a 50 m (Figura 6.3), se observa que en la parte central de la zona de estudio, en la Sección 1, se presenta un máximo resistivo con un rango entre los 600  $\Omega m$  a 1000  $\Omega m$ , rodeando a esta zona se presenta una confección de valores resistivos intermedios entre los 250  $\Omega m$  a 500  $\Omega m$ , se extiende de norte a sur. Las secciones 5, 6, 7 y 8 presentan esta distribución de resistividad aparente. Los mínimos resistivos se observan en las secciones 2, 3, 4 y 9 con un intervalo resistivo de 50  $\Omega m$  a 150  $\Omega m$ .



**Figura 6.3.** Mapa que muestra la distribución de la resistividad aparente a diferentes aberturas de  $AB/2$  (50, 100, 200 y 500 m) en el área de estudio.

En la configuración de  $\rho_a$  para abertura de  $AB/2$  igual a 100 m se observan claramente dos máximos resistivos en las secciones 1 y 6 (en los SEVs 20 y 21) con un rumbo NW-SE y en la sección 7 con rumbo NE-SW, presentando valores resistivos entre los 550 a 900  $\Omega m$ , ubicadas en la parte central de la zona de estudio. La confección que rodea a esta zona presenta rangos resistivos intermedios entre los 200 a 500  $\Omega m$ . Los mínimos resistivos se presentan en la sección 3 y al SE en la sección 9 con un rango entre 65 a 150  $\Omega m$ .

En la configuración de  $\rho_a$  para una abertura  $AB/2$  de 200 m (Figura 6.3), se observan claramente dos máximos resistivos en las secciones 1 y 6 (en el SEV 21) con un rumbo NW-SE y en la sección 7 con rumbo NE-SW ubicadas en la parte central de la zona de estudio, presentando un rango entre los 800 a 1400  $\Omega m$ , la confección que rodea a esta zona presenta rangos resistivos intermedios entre los 200 a 750  $\Omega m$ . Los mínimos resistivos se presentan en dos zonas al NW en la sección 2 (SEV 6), así como en las secciones 3 y 4 en los SEVs (10 y 11) y al SE en la sección 8 (SEV 26) y sección 9 con un intervalo resistivo entre 45 a 150  $\Omega m$ .

En la configuración de  $\rho_a$  para la abertura de  $AB/2$  de 500 m (Figura 6.3) se observan claramente dos franjas de máximos resistivos en las secciones 1 y 6 con un rumbo NW-SE y en la sección 7 con rumbo NE-SW, presentando un rango entre los 1000 a 2000  $\Omega m$ , ubicadas en la parte central de la zona de estudio. La confección que rodea a esta zona presenta rangos resistivos intermedios entre los 600 a 1400  $\Omega m$ . Los mínimos resistivos se presentan en dos zonas al NW, en la Sección 2 (SEV 6) así como en las secciones 3 y 4 (en el SEV 10 y 11) y al SE en la sección 8 (SEV 26), y en la sección 9 con un rango resistivo entre 70 a 500  $\Omega m$ .

De acuerdo a la configuración que presenta la distribución de la resistividad aparente, hace suponer que no se trata de un medio estratificado. En cuanto se profundiza la investigación, la  $\rho_a$  tiende a incrementarse a medida que refleja el carácter de los materiales de origen volcánico, Terciarios y Cuaternarios (brechas, basaltos, riolitas, dacitas y andesitas.); las zonas de bajos resistivos tienden a disminuir el carácter resistivo de los materiales de relleno (aluvión).

Estas variaciones son causadas por la geometría de la cuenca, la granulometría del material de relleno y por el contenido y calidad del agua contenida en el material de relleno y/o roca volcánica alterada

## 6.2. Descripción de perfiles

## Perfil PACH1-Tellez

Se localiza en la parte este del valle en las cercanías del poblado de Tellez, el total de sondeos que lo integran son 5 y se le dio el nombre secuencial SEV 1 hasta SEV 5, con una distancia máxima de abertura en  $AB/2$  de 500 m, tiene centros virtuales cada 500 m entre sí (Figura 6.4). Su longitud de investigación es de 3.0 Km desde el SEV 1 al SEV 5 y se levanto en las brechas y caminos que comunican con las parcelas del valle.

La Figura 6.4a muestra la pseudosección de iso-resistividad aparente reflejando distribución lateral continua buzando del SEV 1 al SEV 4. Se observan máximos relativos a profundidad en el extremo izquierdo del perfil en la parte inferior del SEV 1 hasta el SEV 2 con un rango entre los 1102  $\Omega m$  a 2305  $\Omega m$ . La tendencia semivertical del máximo localizado al inicio del perfil, podría indicar un buzamiento en las unidades resistivas. La distribución de los mínimos resistivos es superficial, con un rango resistivo entre 76  $\Omega m$  a 265  $\Omega m$ .

La sección geoelectrica de la Figura 6.4b, está constituida por capas o unidades resistivas agrupadas en tres paquetes principales. La primera unidad (A) se detectó a lo largo del perfil con un espesor promedio de 3 m, presenta un rango resistivo de 20 a 57  $\Omega m$ , se asocia a la cubierta superficial de composición areno arcillosa. Desde el punto de vista hidráulico se considera importante por ser una unidad permeable en la que se infiltra el agua de lluvia. Intercalada con caliche (A2) con resistividades del orden de 245 a 486  $\Omega m$ ; sin embargo, dado su reducido espesor tiene poca importancia como acuífero.

El paquete (B) que subyace al anterior presenta un espesor máximo de 10 m en el SEV 1, adelgazándose hacia le SEV 5 con un espesor menor a los 2 m, el cual puede identificarse como un horizonte de arenas de alta conductividad hidráulica; cambiando de facie a un conglomerado con un rango resistivo de 299 a 8000  $\Omega m$ , esta capa se extiende a partir del SEV 2 hasta terminar en el SEV 5 su espesor promedio es de 20 m aproximadamente de conductividad hidráulica media.

El paquete (E1) que subyace a estas unidades descritas se encuentra constituida por material volcánico perteneciente a unidades del Grupo Pachuca de composición riolítica, dacítica, andesíticas, se detecto a profundidades a partir de los 50 a 60

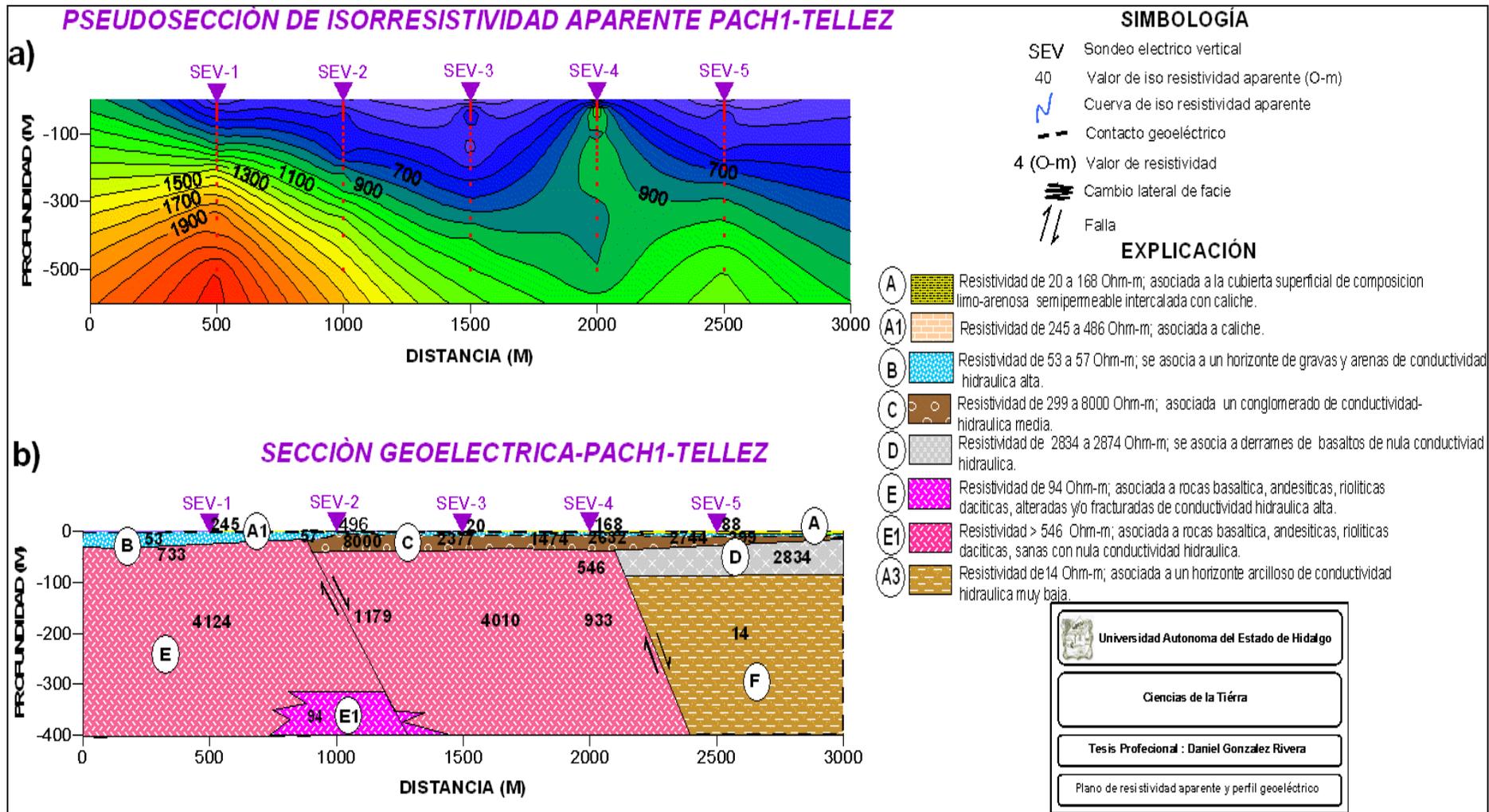


Figura 6.4 a). Pseudosección de resistividad aparente PACH1-Tellez, b) Sección geoelectrica PACH1-Tellez.

metros del SEV 1 al SEV 4, representado por un rango resistivo de 546 a 4124  $\Omega\text{m}$  exhibiendo un grado de fracturamiento diferencial (E), a profundidades del orden de los 300 m se presenta un área sumamente alterada debido a la presencia de termalismo; la conductividad hidráulica de este paquete se caracteriza como baja. Este material fue afectado tectónicamente en el que se interpreta la presencia de fallas normales formando una serie de grabens que soportan el material de relleno del valle. Hacia el flanco lateral derecho del perfil en el SEV 4 y 5 se muestra un escalonamiento que fue rellenado por material aluvial correspondiente a una unidad arcillosa (A3) de resistividad de 14  $\Omega\text{m}$ , de conductividad hidráulica media, cuyo espesor no fue determinado debido a las características del equipo; a esta unidad le sobreyace material volcánico correspondiente a lavas basálticas (D) exhibiendo una resistividad de 2834  $\Omega\text{m}$ ; es de baja conductividad hidráulica.

### **Perfil PACH2-Nopalapa**

Se ubica al sur de la localidad de Nopalapa, levantado sobre un camino de terracería, conformada por los sondeos eléctricos 6 y 7, cuya longitud es de 1.5 km, esta sección fue nombrada Nopalapa, por la localidad donde se efectuaron (Figura 6.5).

La configuración de resistividad aparente del Perfil PACH2-Nopalapa se muestra en la Figura 6.5a, los mínimos resistivos se registraron en un rango entre 60 a 86  $\Omega\text{m}$  para aberturas de  $AB/2 = 2$  m. A profundidad se observa una zona de máximos resistivos que abarcan principalmente el SEV 6, y la mitad del SEV 7 para aberturas  $AB/2 = 500$  m, exhibiendo un rango entre 580 a 659  $\Omega\text{m}$ .

En La sección geoelectrica de la Figura 6.5b, se aprecia un total de 4 horizontes. Desde el punto de vista hidrogeológico, las dos primeras capas carecen de importancia acuífera debido a su reducido espesor.

La primera unidad (A) presenta una resistividad de 30 a 60  $\Omega\text{m}$  con un espesor de a 1 m aumentando su potencia hacia el SEV 7 con un espesor de 4 m, se asocia a un horizonte areno arcilloso que forma la cubierta superficial.

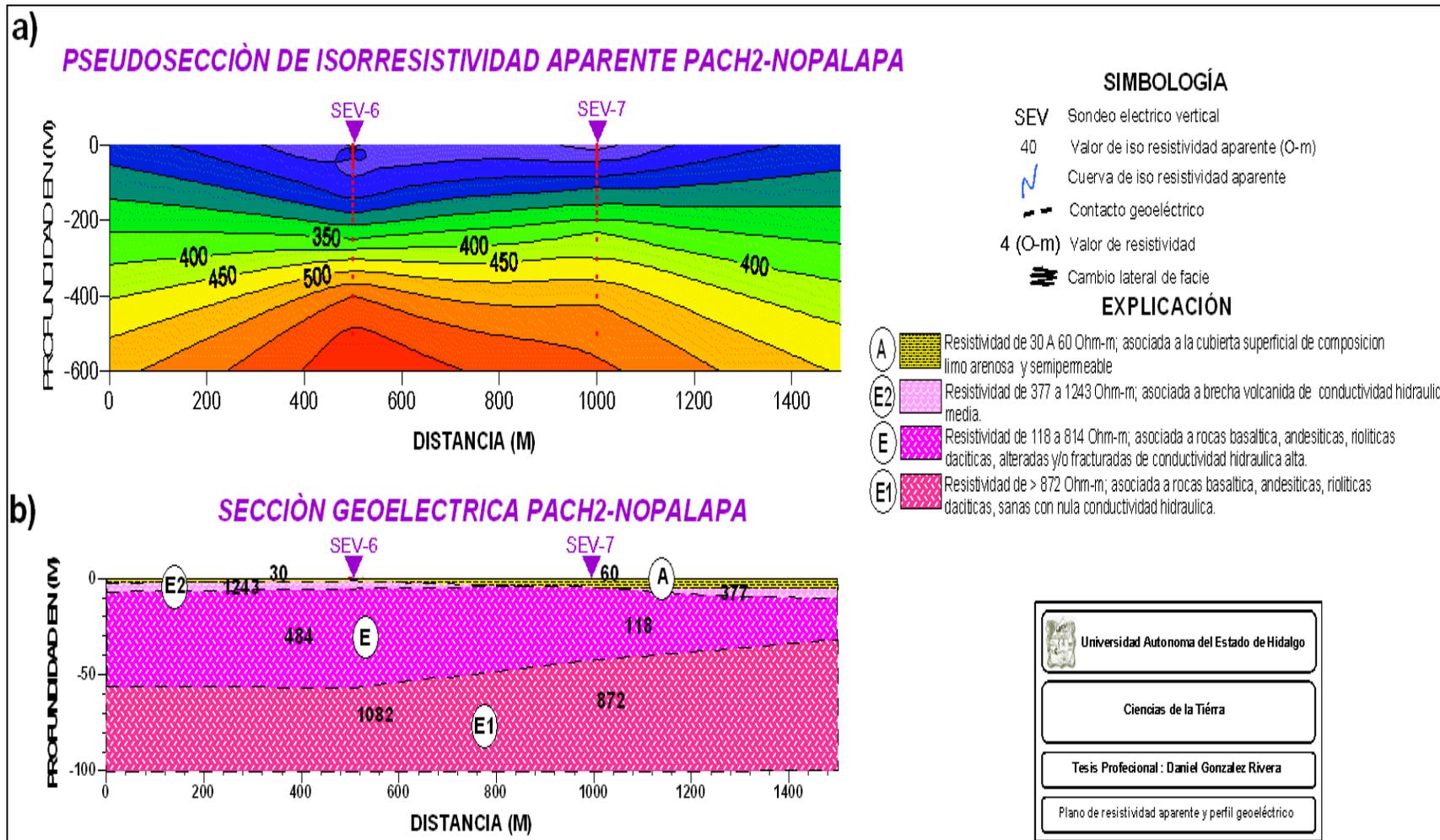


Figura 6.5 a). Pseudosección de resistividad aparente PACH2-Nopalapa, b) Sección geoelectrica PACH2-Nopalapa.

La segunda (E2) capa presenta un resistividad de entre 377 a 1,243  $\Omega\text{m}$  con espesor máximo de 4 m, en el SEV 7 disminuyendo hacia SEV 6 con un espesor 2.4 m, asociado a un horizonte de brecha volcánica de conductividad hidráulica media.

La tercera capa (E) se extiende a lo largo del perfil su máximo espesor se presenta en el SEV 6 de 53.8 m, continuando con un adelgazamiento hacia SEV 7, con un espesor promedio de 34 m, su rango resistivo esta dado entre 118 a 484  $\Omega\text{m}$ , correspondiente a rocas del Grupo Pachuca, sumamente alteradas y/o fracturadas de conductividad hidráulica alta. Debido a sus rangos de resistividades y espesores considerables, esta capa tiene condiciones favorables de almacenar agua subterránea.

Subyaciendo una cuarta capa (E1) con un espesor infinito, esta se profundiza a mas de los 100 m, presentando un rango resistivo entre 872 a 1082  $\Omega\text{m}$  cuya asociación corresponde a rocas del Grupo Pachuca encontrándose poco alteradas lo cual reduce sus condiciones de almacenar agua.

### **Perfil PACH3- La Noria**

Se ubica al oeste de la localidad de la Noria con un total de 2 sondeos que la conforman, esta sección se levantó a lo largo de un camino de terracería cercana a las vías férreas, su longitud es de 1.5 km esta sección fue nombrada como La Noria (Figura 6.6).

El carácter de resistividad se muestra en la Figura 6.6a. Mínimos resistivos registrados tienen un rango entre 31  $\Omega\text{m}$  a 48  $\Omega\text{m}$  para aberturas de  $AB/2$  igual a 2 m SEV 23,  $AB/2$  igual a 2 y 3 m. A profundidad se observa un máximo resistivo que para aberturas  $AB/2$  igual a 500 m observándose en el SEV 8, exhibiendo un rango entre 134  $\Omega\text{m}$  a 580  $\Omega\text{m}$ .

La sección geoelectrica que se muestra en la Figura 6.6b muestra un total 5 paquetes; las primeras tres unidades, son las más superficiales y debido a su reducido espesor carecen de importancia acuífera. En la parte superficial se presenta una capa (A), muy delgada a lo largo del perfil, de espesor menor a 3 m presentando un rango resistivo entre 27  $\Omega\text{m}$  a 73  $\Omega\text{m}$  asociado a la cubierta superficial de composición arenosa con gravas.

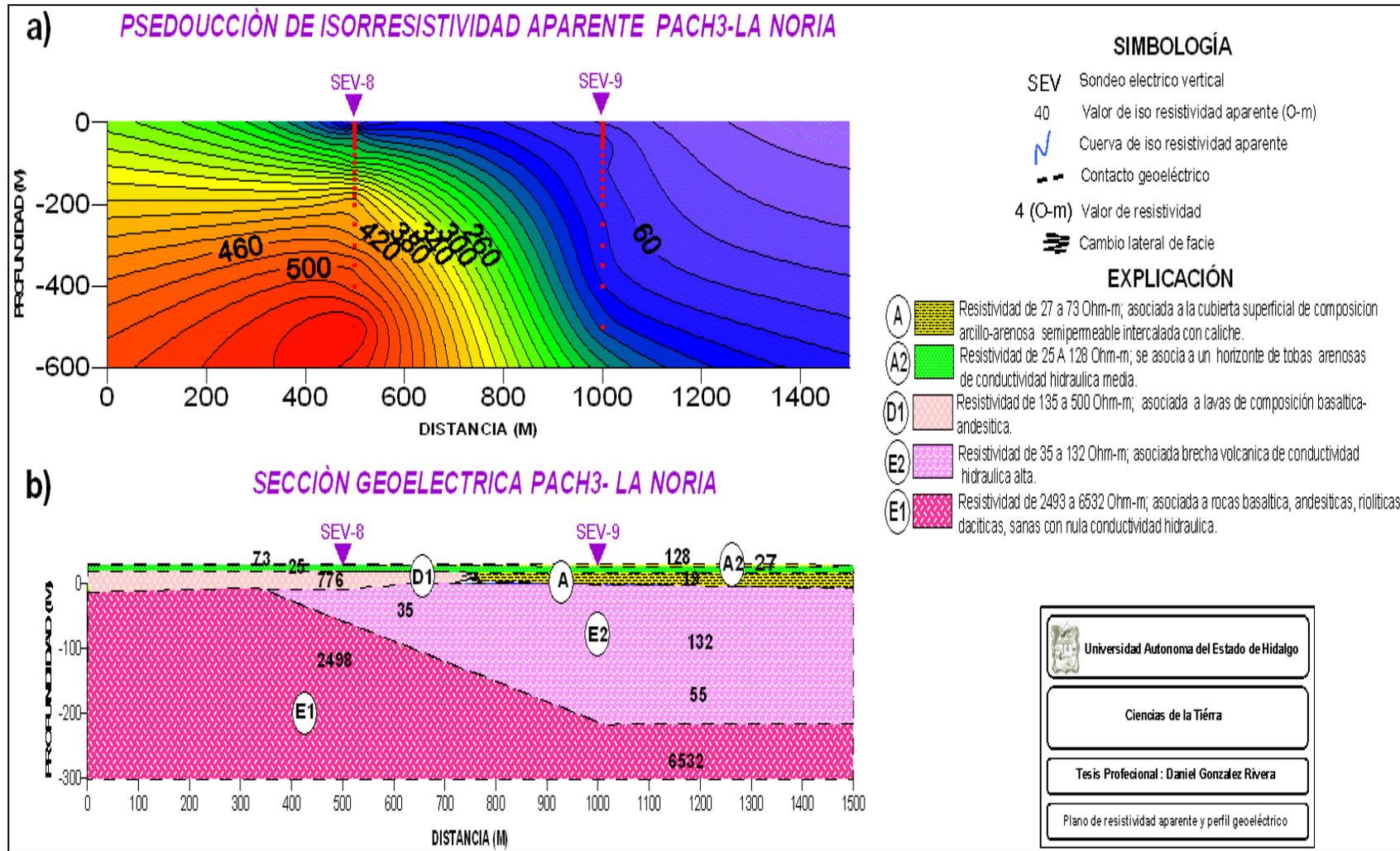


Figura 6.6. a). Pseudosección de resistividad aparente PACH3-La Noria, b) Sección geoelectrica PACH3-La Noria.

La capa (A2) que subyace a la (A) presenta un rango resistivo entre 25 a 128  $\Omega \cdot m$  a con un espesor promedio de 2 m a lo largo del perfil, se asocia con tobas arenosas de conductividad hidráulica media.

Posteriormente le subyace un paquete constituido por 2 unidades (D1 y A), la primera presenta un rango resistivo de 776  $\Omega \cdot m$  exhibiendo un espesor aproximado de 6 m en el SEV 8 asociado con lavas de composición basáltica-andesítica. Hacia el lado derecho de la sección (SEV 9) se interpreta una capa asociada a una unidad arcillosa de espesor promedio de 6 metros, exhibiendo una resistividad de 19  $\Omega \cdot m$ .

La cuarta unidad (E2) presenta un espesor aproximadamente de 8 m, en el SEV 8, continua con un engrosamiento de 180 m aproximadamente hacia el SEV 9 presenta un carácter resistivo entre 35  $\Omega m$  a 132  $\Omega m$ , asociado brecha volcánica de conductividad hidráulica alta.

La quinta unidad (E1) geoelectrica se presenta a profundidades de los 20 m en el SEV 8 y se profundiza hacia el SEV 9 a una profundidad de 180 m, con una apertura de AB/2 de 500 m, no se alcanzo a determinar su espesor, presenta un rango resistivo entre 2498 a 6632  $\Omega m$ , correspondiente a rocas del Grupo Pachuca, este tipo de resistividades indica pocas condiciones de almacenar agua subterránea.

#### **Perfil PACH4- La Higa**

Se ubica al noroeste de la localidad la Higa formada con un total de 3 sondeos cuya longitud es de 2 km, fue nombrada como la Higa (Figura 6.7).

La configuración de resistividad aparente se muestra en la Figura 6.7a, los mínimos resistivos se registraron en los tres sondeos, con un rango entre 29  $\Omega m$  a 46  $\Omega m$  para aberturas de AB/2 igual a 2 m SEV 10, AB/2 igual a 16 m SEV 11, y AB/2 igual a 20 m SEV 12. A profundidad se observa una zona de máximos resistivos que abarcan principalmente el SEV 10, 11 para aberturas AB/2 igual a 500 m en el SEV 10 y para abertura AB/2 igual a 400 m en el SEV 11, exhibiendo un rango entre 910  $\Omega m$  a 4277  $\Omega m$ .

En la sección geoelectrica de la Figura 6.7b, se aprecia 4 principales horizontes resistivos. La primera unidad geoelectrica (A), presenta un rango resistivo de 10  $\Omega m$  de espesor menor a 2.5 metros a lo largo de todo el perfil, se asocia a la cubierta superficial de composición arcillosa (A3), intercalada con caliche de resistividad de 315  $\Omega m$  (A1).

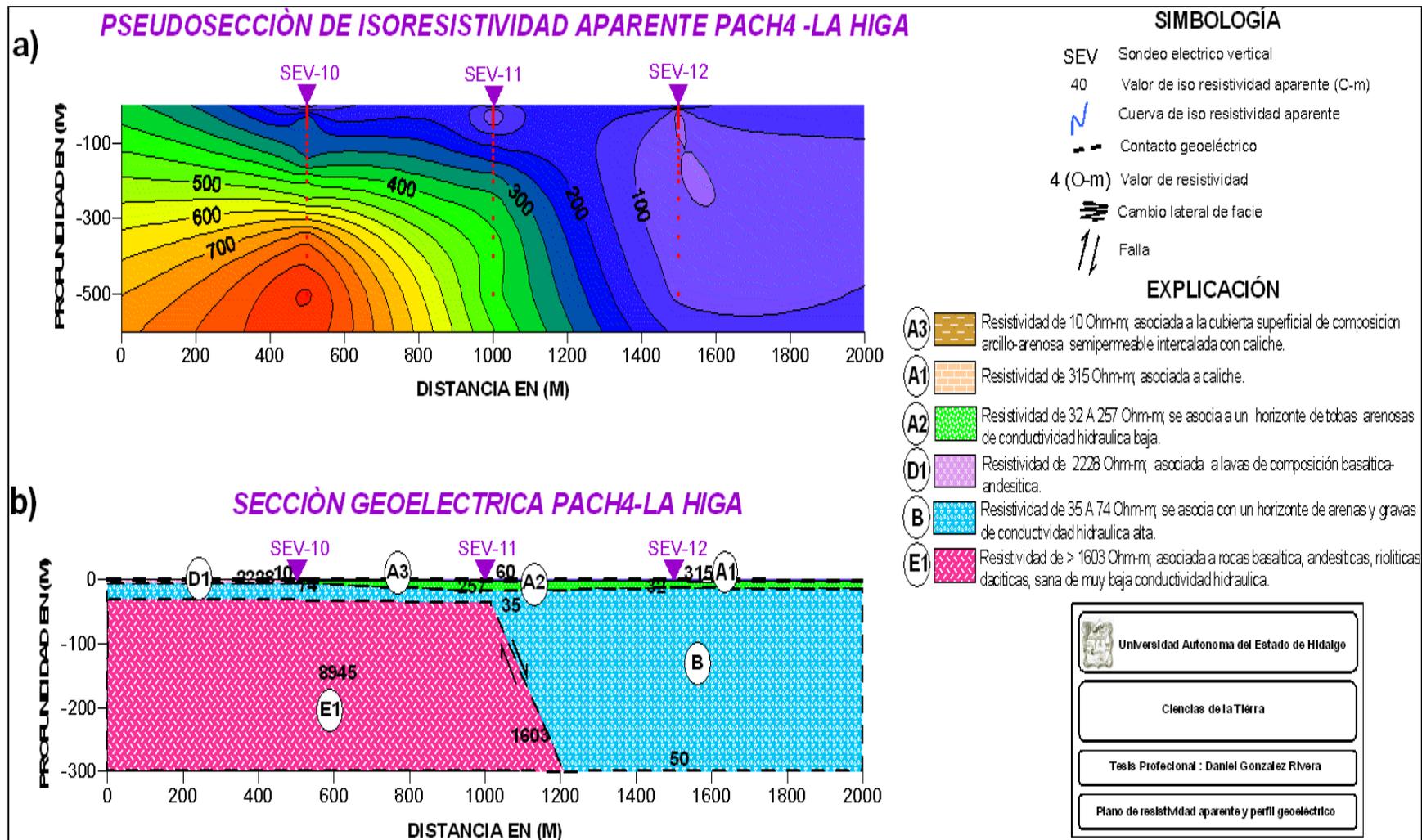


Figura 6.7 a). Pseudosección de resistividad aparente PACH4-La Higa, b) Sección geoelectrica PACH4-La Higa.

El segundo paquete se encuentra conformado por 2 unidades, la primera presenta un rango entre 32  $\Omega\text{m}$  (A2) a 257  $\Omega\text{m}$  , exhibiendo un espesor máximo de 16 m en el SEV 11 disminuyendo hacia los flancos del SEV 10 a 4.5 m, hacia el SEV 12 con un espesor de 11 m, se asocia con un horizonte de tobas arenosas de baja conductividad hidráulica con un cambio de facie en el SEV 10 asociado a derrames de lavas de composición basáltica-andesítica, esta segunda unidad (A2) se encuentra representada por una resistividad de 2228  $\Omega\text{m}$ .

El tercer paquete (B), que subyace al anterior se describe por una unidad que se extiende a lo largo del perfil con espesor variable, su máximo espesor (280 m) se muestra en el SEV 12 y es menor a 37 m, continuando con un adelgazamiento hacia el extremo lateral izquierdo entre los SEV 11, 10 con un espesor promedio de 34 m, su rango resistivo esta dado entre 35  $\Omega\text{m}$  a 74  $\Omega\text{m}$  se asocia con arenas y gravas saturadas; de conductividad hidráulica alta, lo cual es indicativo de condiciones favorables para el almacenamiento de agua subterránea. Subyaciendo a esta capa se encuentra un paquete E1, que se profundiza hacia el SEV 12, asociado a rocas terciarias pertenecientes al Grupo Pachuca, de resistividad de 1082 a 8945  $\Omega\text{m}$ , lo cual reduce sus condiciones acuíferas.

### **Perfil PACH5- Acayuca**

Se ubica al sureste de la localidad de Acayuca conformada por un total de 4 sondeos cuya longitud es de 2.5 km, fue nombrada como Acayuca (Figura 6.8).

La confección de la sección de iso-resistividad aparente (Figura 6.8a), refleja una distribución de mínimos resistivos registrada para una abertura de  $AB/2$  igual a 40 m en el SEV 13 y hasta los SEVS,14, 15,16  $AB/2$  igual a 8 m, con un rango resistivo entre 106  $\Omega\text{m}$  a 134  $\Omega\text{m}$ ; a profundidad se observa una zona de máximo resistivo que se acentua en la parte inferior del SEV 15 y 16 para las aberturas  $AB/2$  igual a 500 m con un rango entre los 650  $\Omega\text{m}$  a 1000  $\Omega\text{m}$ . Esta sección esquematiza un modelo estratificado con una distribución de mínimos en las primeras capas.

Esto se aprecia en la sección geoelectrica de la Figura 6.8b, la cual está constituida por unidades o capas geoelectricas; la primera capa A2, de resistividad de 95 a 172  $\Omega\text{m}$  extendiéndose bajo los SEVS 13 continuando con espesores irregulares a no más de 12 metros hasta el SEV 16, se asocia con una toba que dado su limitado espesor carece de potencial acuífero, esta capa muestra intercalaciones de caliche (A1) con resistividad 2194  $\Omega\text{m}$  del SEV 13 al SEV 16.

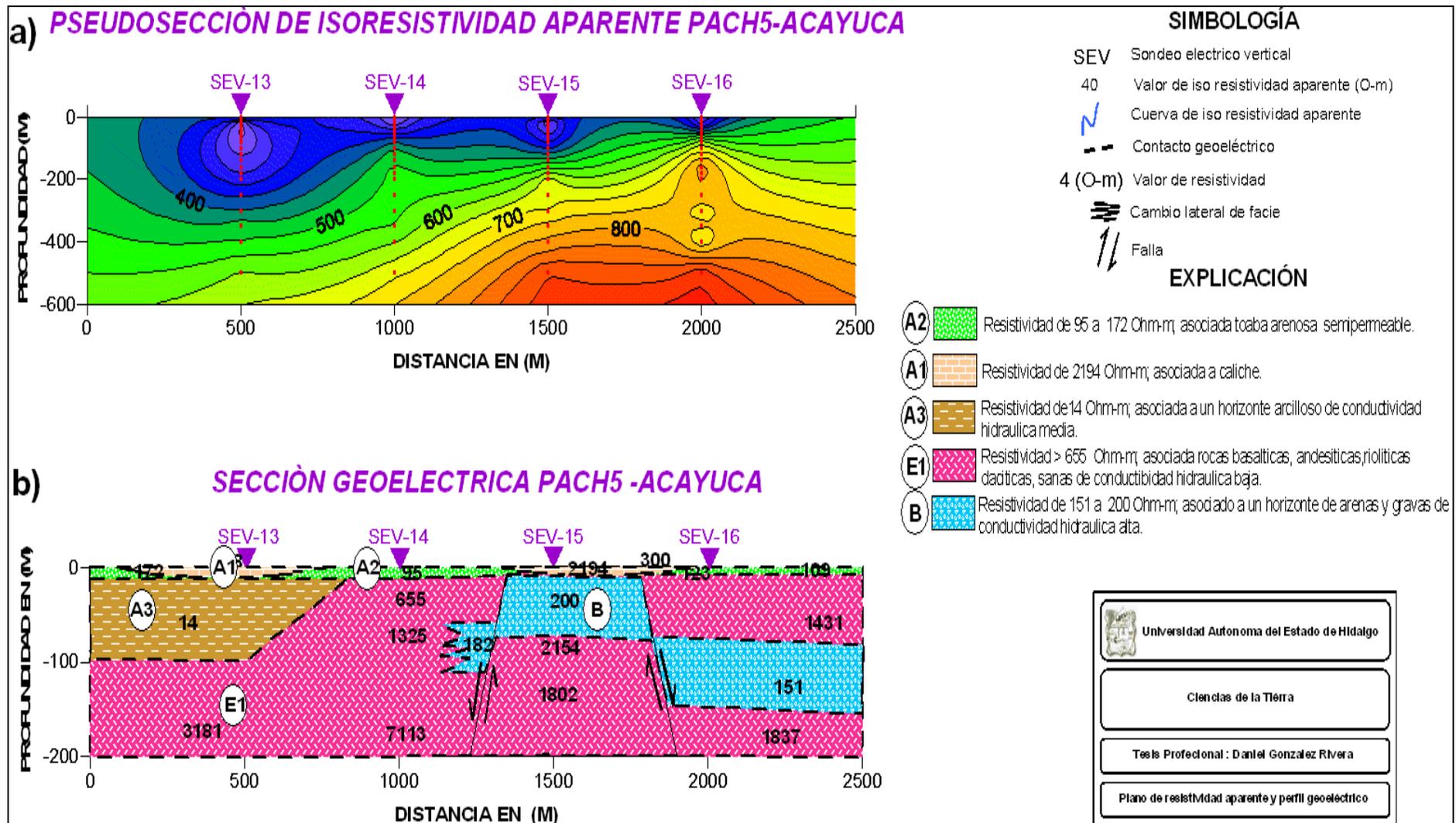


Figura 6.8. a). Pseudosección de resistividad aparente PACH5-Acayuca, b) Sección geoelectrica PACH5-Acayuca.

Esto se aprecia en la sección geoelectrica de la Figura 6.8b, la cual está constituida por unidades o capas geoelectricas; la primera capa (A2), de resistividad de 95 a 172  $\Omega\text{m}$  extendiéndose bajo los SEVS 13 continuando con espesores irregulares a no más de 12 metros hasta el SEV 16, se asocia con una toba que dado su limitado espesor carece de potencial acuifero, esta capa muestra intercalaciones de caliche (A1) con resistividad 2194  $\Omega\text{m}$  del SEV 13 al SEV 16.

Subyaciendo a los paquetes superficiales se localiza un paquete de gran potencia (A3) registrado a partir de una profundidad promedio de 12 m en el SEV 13, presenta resistividad de 14  $\Omega\text{m}$  y es asociada a material arcilloso con espesor medio de 80 m; sin embargo, dada sus características resistivas tiene mínimas condiciones acuiferas. Una unidad geoelectrica (E1) de resistividades de 655 a 7113  $\Omega\text{m}$ , correlacionable de conductividad media descansa sobre material volcánico, basaltos andesíticos poco alterados lo cual es indicativo de pocas condiciones de almacenar agua. En el SEV 12, 16 este material se encuentra fallado mostrando un graben, intercalado con un horizonte de gravas y arenas (B) con valores de resistividad de 151 a 200  $\Omega\text{m}$ , con un espesor promedio de 50 m, lo cual es considerado como una capa con potencial acuifero.

### **Perfil PACH6- Acayuca II**

Se ubica al sureste de la localidad de Acayuca conformada con un total de 5 sondeos cuya longitud es de 3 km fue nombrada como Acayuca II (Figura 6.9).

La confección de la sección de iso-resistividad aparente Figura 6.9a, refleja una distribución de mínimos resistivos en la parte superficial de todos los SEVS (17,18,19,21) con un rango entre 66  $\Omega\text{m}$  a 220  $\Omega\text{m}$  y se observa para una abertura de  $AB/2$  igual a 16 m para el SEV 19,  $AB/2$  igual a 20 m para el SEV 18, 20, para una abertura de  $AB/2$  igual a 25 m para el SEV 17; a profundidad se observa dos zonas de máximo resistivo que se acentúa en los SEV 17 y 18 para las aberturas  $AB/2$  igual a 500 m con un rango entre los 1109  $\Omega\text{m}$  a 1434  $\Omega\text{m}$  y la segunda zona se observa en el SEV 21 para una abertura  $AB/2$  igual a 500 m con una resistividad de 1567  $\Omega\text{m}$ .

En la sección geoelectrica de la Figura 6.9b, se aprecia un total de 4 horizontes. La primera capa geoelectrica (A2), presenta un rango resistivo de 70  $\Omega\text{m}$  y un espesor medio de 6 metros en el SEV 19 continuando con espesores delgados de 2.5 a 4 m en los flancos de los SEV 17 y 21, se asocia a un horizonte de toba arenosa la cual cubre

lavas basálticas (D1), con un rango resistivo de 419  $\Omega\text{m}$  a 794  $\Omega\text{m}$ , y se encuentra intercalado con caliche (A1) con una resistividad de 217  $\Omega\text{m}$  a 687  $\Omega\text{m}$ .

Debajo de la unidad (A1) se encuentra la unidad A con resistividades de 19  $\Omega\text{m}$ , asociada limos y arenas.

La segunda capa B, presenta un rango entre 86 a 195  $\Omega\text{m}$  y un espesor máximo de 55 m en el SEV 19 disminuyendo hacia los flancos de los SEVS 17 y 20 con un espesor de 12 a 4 m, asociado a un horizonte de gravas y arenas de alta conductividad hidráulica. Dada las características resistivas y el espesor que presenta, se considera que tiene condiciones acuíferas favorables.

Subyaciendo a la unidad (B), se encuentra la unidad (E2), con resistividades de 228 a 852  $\Omega\text{m}$  y esta rellena fosas tectónicas en rocas terciarias. Debido a los rangos resistivos que presenta y considerando buenos espesores, se interpreta como una unidad con condiciones acuíferas favorables.

La unidad geoelectrica E1, con mayor espesor pertenece al Grupo Pachuca, exhibe un rango resistivo de 2936 a 6440  $\Omega\text{m}$  motivo por el cual no presenta condiciones acuíferas favorables.

### **Perfil PACH7- Zapotlan**

Ubicada al sureste de la localidad de Zapotlan conformada con un total de 4 sondeos con una longitud de 2.5 km fue nombrada como Zapotlan (Figura 6.10).

El carácter de resistividad aparente se muestra en la Figura 6.10a, mínimos resistivos registrados en los SEV 22,23,24,25, con un rango entre 49  $\Omega\text{m}$  a 238  $\Omega\text{m}$  para aberturas de  $AB/2$  igual a 2 m SEV 23,  $AB/2$  igual a 16 m SEV 22,25 y  $AB/2$  igual a 20 m SEV 24. A profundidad se observa una zona de máximos resistivos que abarcan todo el perfil para aberturas  $AB/2$  igual a 500 m observándose un pequeño máximo a una abertura  $AB/2$  igual a 350 m SEV 25, exhibiendo un rango entre 1407  $\Omega\text{m}$  a 2074  $\Omega\text{m}$ .

La sección geoelectrica de la Figura 6.10b, muestra un total de 6 unidades resistivas; en la parte superficial se presenta un paquete (B), constituido por un horizonte muy delgado de espesor de 2.5 m que se engruesa hacia la parte final del perfil entre el SEV 24,25 con un espesor promedio de 3.5 m aproximadamente presentando una

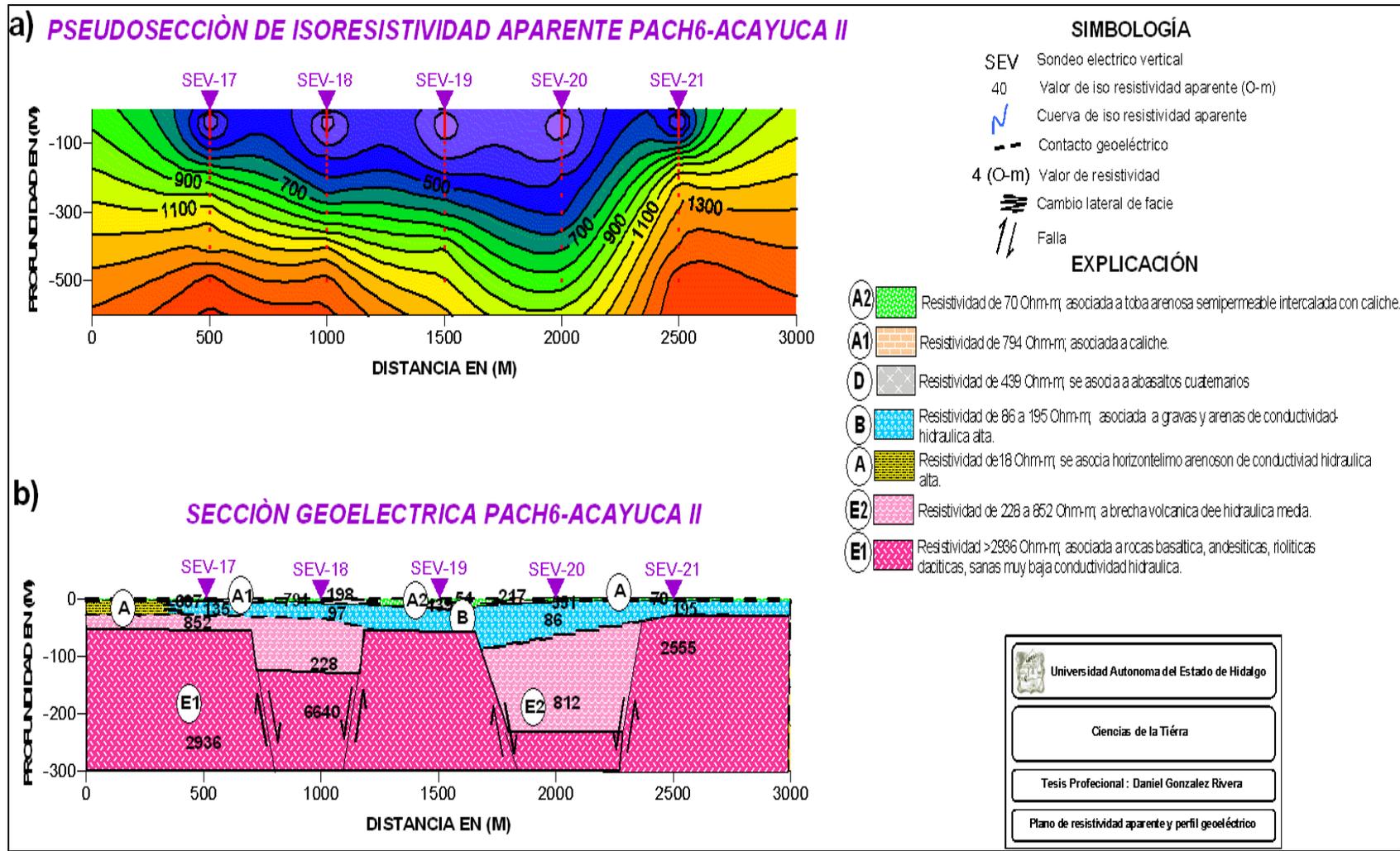


Figura 6.9. a). Pseudosección de resistividad aparente PACH6-Acayuca II, b) Sección geoelectrica PACH6-Acayuca II.

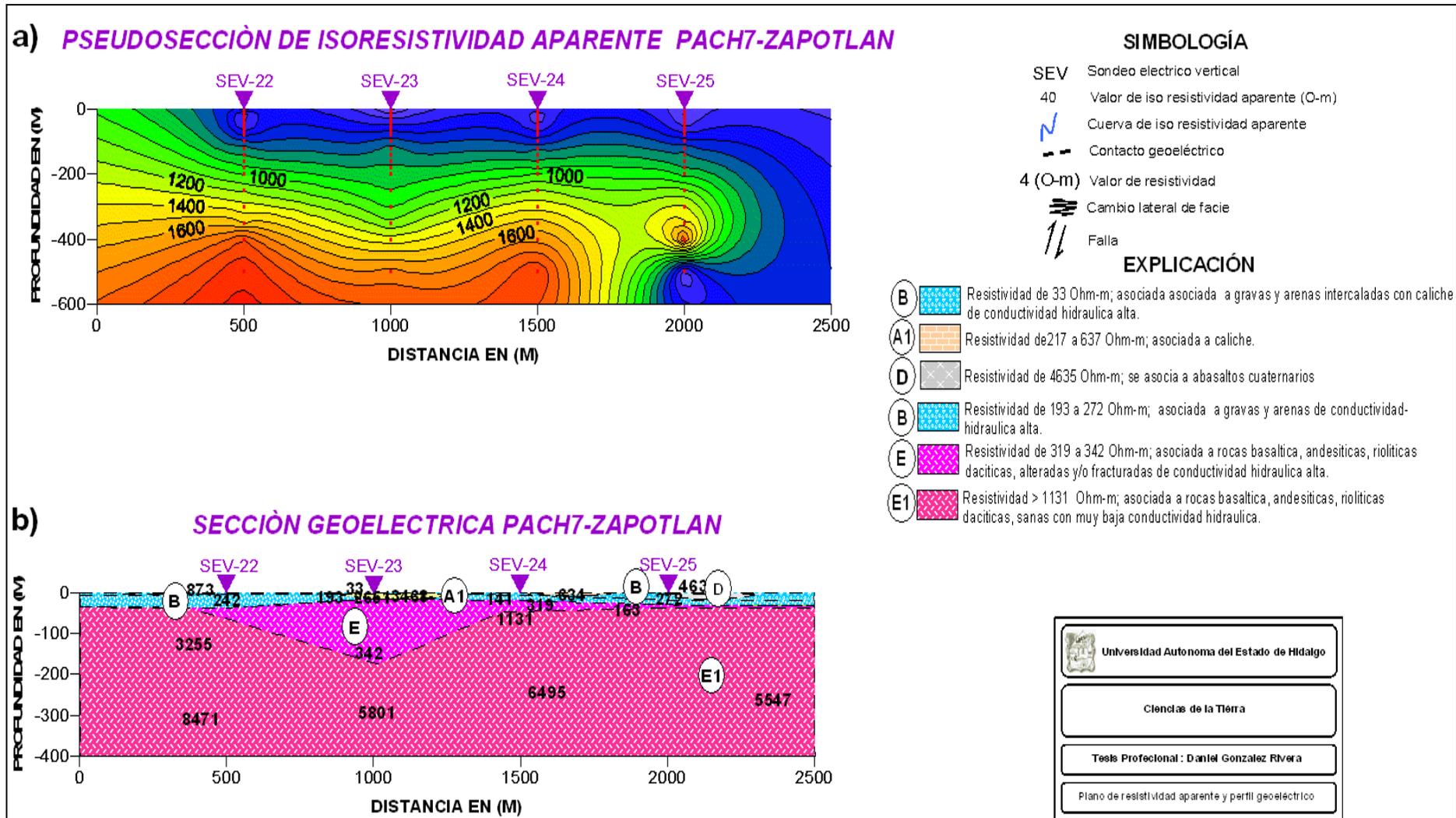


Figura 6.10. a). Pseudosección de resistividad aparente PACH7-Zapotlan, b) Sección geoelectrica PACH7-Zapotlan

resistividad de 33  $\Omega\text{m}$ , asociado a gravas y arenas exhibiendo intercalaciones de caliche (A1) de carácter resistivo de 217 a 637  $\Omega\text{m}$  y con rocas basálticas cuaternarias (D1) presentando una resistividad de 4635  $\Omega\text{m}$ . Este paquete es semipermeable.

EL siguiente paquete que le subyace, presenta un rango resistivo entre 193 a 272 con un espesor promedio de 36 m en el SEV 22 adelgazándose hacia el SEV 25 con un espesor de aproximadamente de 27 m, asociado a un horizonte de gravas y arenas (B) de conductividad hidráulica alta.

La capa (E), presenta un rango resistivo de 319  $\Omega\text{m}$  a 342  $\Omega\text{m}$  exhibiendo un espesor aproximado de 164 m en el SEV 23 adelgazándose hacia el SEV 24 con un espesor de 25 m, continuándose hacia el final del SEV 25 con un espesor de 4 m, con estas características resistivas y limitado espesor se considera que localmente tiene posibilidades acuíferas en el SEV-23.

El paquete (E1), que le subyace, no pudo ser atravesado debido a las limitaciones del resistivímetro; se correlaciona con rocas terciarias pertenecientes al Grupo Pachuca con un grado de fracturamiento muy bajo, con rango resistivo de 1131 a 6195  $\Omega\text{m}$ , lo que reduce sus posibilidades acuíferas.

### **Perfil PACH8- Vicente Guerrero**

Esta sección conformada por un total de 3 sondeos cuya longitud es de 2 km fue nombrada con el nombre de la localidad mas cercana que se ubica al sureste de la localidad de Vicente Guerrero, (Figura 6.11).

La configuración de resistividad aparente se muestra en la Figura 6.11a, los mínimos resistivos se registraron en los SEV 26,27 y 28, con un rango entre 41  $\Omega\text{m}$  a 150  $\Omega\text{m}$  para aberturas de  $AB/2$  igual a 2 m SEV 26,  $AB/2$  igual a 16 m SEV 27, y  $AB/2$  igual a 500 m SEV 28. A profundidad se observa una zona de máximos resistivos que abarcan principalmente en el SEV 26, 27 para aberturas  $AB/2$  igual a 500 m y en el SEV 28 para abertura  $AB/2$  igual a 2 m, exhibiendo un rango entre 487  $\Omega\text{m}$  a 1567  $\Omega\text{m}$ .

En la sección geoelectrica de la Figura 6.11b, se aprecia un total de paquetes geoelectricos principales. La primera unidad geoelectrica (A3), presenta un rango resistivo de 10  $\Omega\text{m}$  con espesor menor a 2 metros a lo largo de todo el perfil, se asocia a un horizonte arcilloso intercalado con caliche (A1) con resistividad de 369 a 1455  $\Omega\text{m}$ .

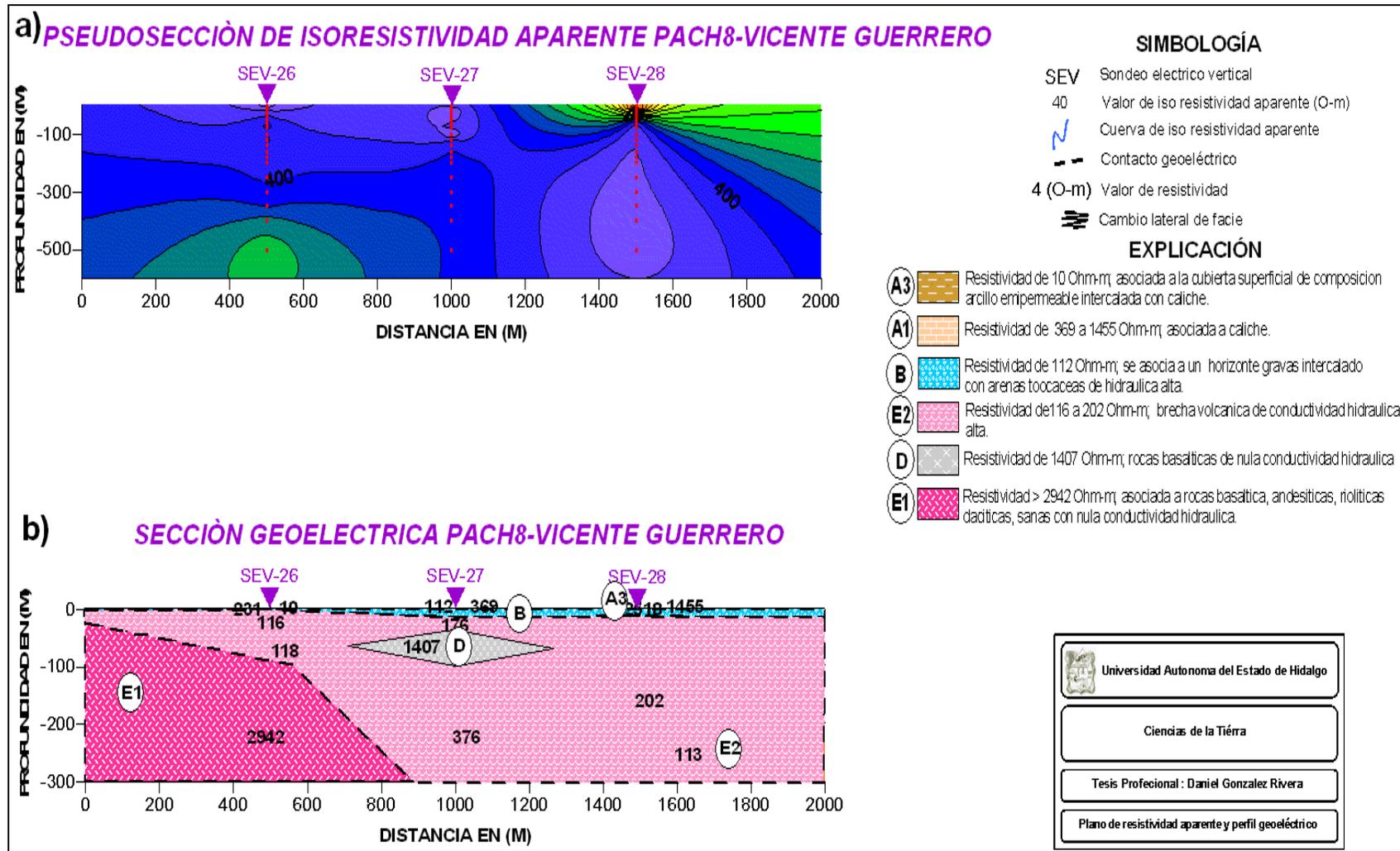


Figura 6.11. a). Pseudosección de resistividad aparente PACH8-Vicente Guerrero, b) Sección geoelectrica PACH8-Vicente Guerrero.

El paquete que le subyace (B) presenta resistividades de 112  $\Omega\text{m}$ , y un espesor máximo de 14 en el SEV 27 disminuyendo hacia los flancos del SEV 26, 28 con un espesor menor a 11 m, asociado a un horizonte de gravas intercaladas con tobas arenosas.

El tercer paquete que subyace al anterior se encuentra constituido por 2 unidades con gran espesor, se registro a profundidades a partir de los 20 m. La primera unidad se extiende a lo largo del perfil correlacionándola con brecha volcánica (E2) por el valor resistivo que presenta de 116 a 202  $\Omega\text{m}$ , se considera una conductividad hidráulica alta, esta unidad se encuentra intercalada con rocas basálticas (D) del orden resistivo de 1407  $\Omega\text{m}$ , registradas en el SEV 27 su espesor promedio es de 50 m, se le asocia una muy baja conductividad hidráulica. Se considera que la unidad (E2), presenta buenas condiciones acuíferas debido a sus resistividades y a los espesores que presenta.

El espesor de la brecha decrece hacia el SEV 26, entrando en contacto rocas volcánicas terciarias (E1) pertenecientes al Grupo Pachuca, con resistividad mayores a 2942  $\Omega\text{m}$  en estado no alterado, lo cual reduce notablemente sus posibilidades acuíferas.

### **Perfil PACH9- Tezontepec**

Fue nombrada como Tezontepec, se ubica al noroeste de la misma localidad, es conformada por 3 sondeos cuya longitud de 2 km, (Figura 6.12).

La confección de resistividad aparente se muestra en la Figura 6.12a, los Mínimos resistivos se registraron en los SEV 29,30,31, con un rango entre 42  $\Omega\text{m}$  a 182  $\Omega\text{m}$  para aberturas de  $AB/2$  igual a 2 m SEV 29,  $AB/2$  igual a 25 m SEV 31, y  $AB/2$  igual a 180 m SEV 30. A profundidad se observa una zona de máximos resistivos que abarcan principalmente en el SEV 29, 31 para aberturas  $AB/2$  igual a 500 m y en el SEV 30 para abertura  $AB/2$  igual a 20 m, exhibiendo un rango entre 210  $\Omega\text{m}$  a 1306  $\Omega\text{m}$ .

En la sección geoelectrica de la Figura 6.12b, se aprecia un total de 5 capas. La primera unidad geoelectrica (A1), presenta un rango entre 32  $\Omega\text{m}$  a 257  $\Omega\text{m}$  y un espesor menor a 5 m en el SEV 29 continuando hacia el SEV 30 con 50 m alcanzando su máximo espesor hacia el SEV 30 con 80 m, asociado a un horizonte arenas intercaladas con gravas de buena conductividad hidráulica, intercalado con (A1) de resistividad de 1001  $\Omega\text{m}$ .

Subyaciendo a esta última, se presenta un paquete (C), identificada a poca profundidad en el SEV 29, cuyo espesor no fue determinado en los sondeos 30 y 31 dada las características del equipo, se asocia con un material conglomerático que refleja valores de resistividad de 33 a 56  $\Omega\text{m}$ , especificando alta conductividad hidráulica; esta unidad se encuentra cortada por una estructura tectónica que se define como una falla normal mostrando escalonamiento. Debido a sus características geoelectricas y considerable espesor, se identifica como una unidad con buenas condiciones acuíferas.

La unidad (C), le subyace la unidad (E1) asociada a rocas volcánica terciarias correspondientes al Grupo Pachuca con carácter resistivo de 1263 a 1622  $\Omega\text{m}$ , con poca alteración, sin fracturamiento, el carácter de la conductividad hidráulica es bajo; esta unidad se registró a la profundidad de 47 m. aunque su espesor es mayor a los 200 m, dada sus características de resistividad posee condiciones poco favorables de almacenar agua.

Entre las unidades (A2 y C) se encuentra una unidad (D), asociada a un material de rocas basálticas cuaternarias con propiedades geoelectricas de 8354  $\Omega\text{m}$ , detectada a una profundidad promedio de 80 m. Se encuentra suprayaciendo al escalonamiento del material conglomerático. Debido a estos rangos resistivos se considera que no tiene condiciones de almacenar agua.

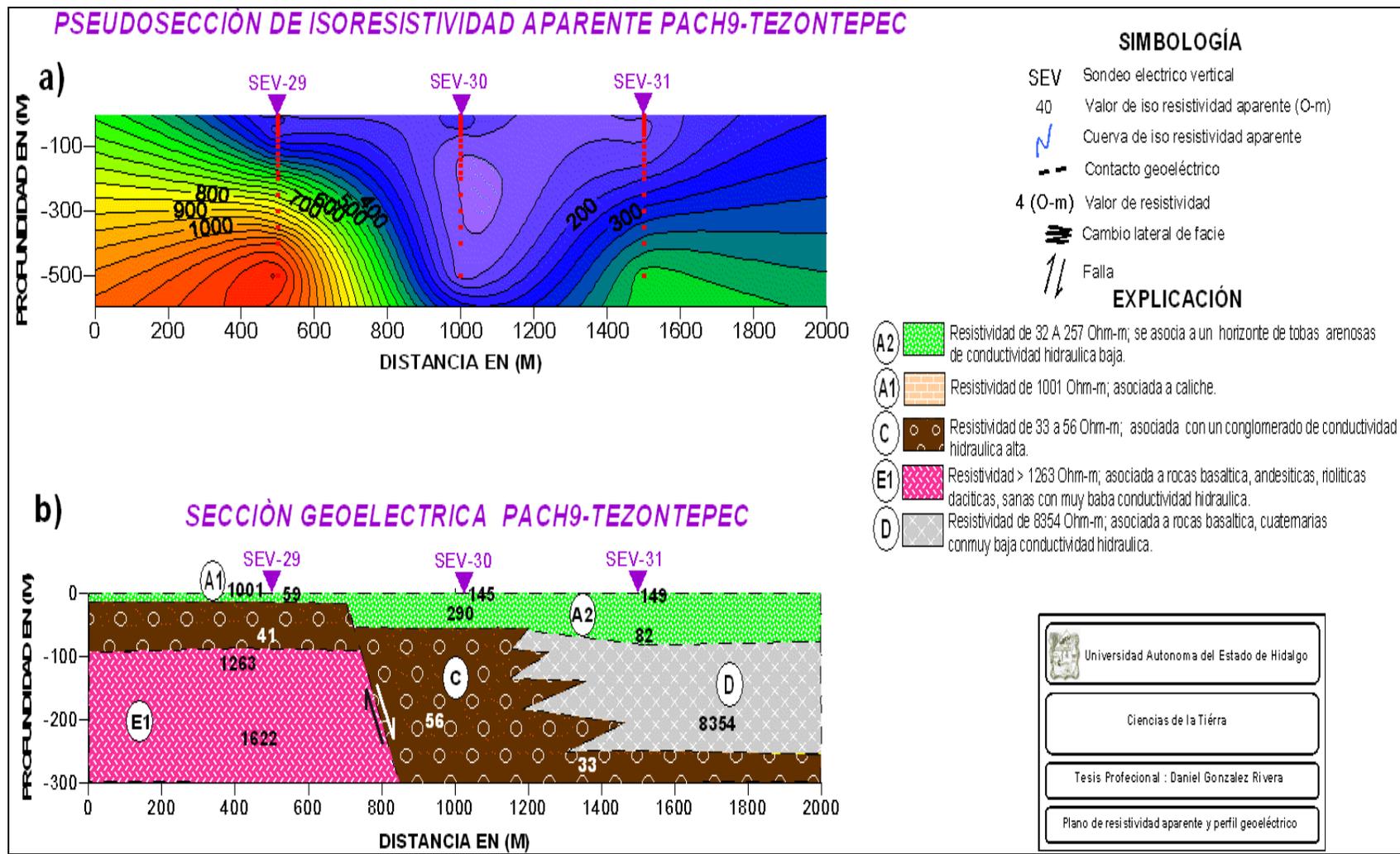
### **6.3. Evaluación de zonas potenciales para agua subterránea**

Las aéreas consideradas con potencial acuífero fueron obtenidas a partir de las secciones geoelectricas, descritas en la sección 6.2.

La sección geoelectrica PACH1-Tellez., en general no presenta buenas condiciones acuíferas; sin embargo en el SEV 2 se detecto a los 300 m, una unidad con condiciones favorables (Figura 6.4).

La sección geoelectrica PACH2-Nopalapa; presenta buenas condiciones acuíferas en el SEV 6y 7 con un espesor de 60 m sobre rocas volcánicas alteradas (Figura 6.5).

La sección geoelectrica PACH3-La Noria, se presentan muy buenas condiciones acuíferas en el SEV 9, alcanzándose espesores de hasta 200 m de brecha volcánica (Figura 6.6).



**Figura 6.12. a).** Pseudosección de resistividad aparente PACH9-Tezontepec, **b)** Sección geoelectrica PACH9-Tezontepec.

La sección geoelectrica PACH4-La Higa, presenta muy buenas condiciones acuíferas en el SEV 12, en el cual se alcanzan hasta 300 m de espesor de arenas y gravas (Figura 6.7).

En la sección geoelectrica PACH5-Acayuca, solo se presentan condiciones favorables en una capa con espesores de 100 metros, de arenas y gravas presentando mejores condiciones el SEV 16 (Figura 6.8).

La sección geoelectrica PACH6-Acayuca 2, se presentan condiciones favorables en los SEV 18 y 20, en los cuales se alcanzan espesores de 250 m, en gravas arenas y brecha volcánica (Figura 6.9).

La sección geoelectrica PACH7-Zapotlan, no presenta condiciones acuíferas favorables excepto en SEV 23, en el cual se alcanzan espesores de 180 m de roca volcánica fracturada (Figura 6.10).

La sección geoelectrica PACH8-Vicente Guerrero, presenta excelentes condiciones acuíferas en los SEV 27 y 28 alcanzando espesores mayores a 300 m de brecha volcánica (Figura 6.11).

La sección geoelectrica PACH9-Tezontepec, presenta condiciones acuíferas favorables, principalmente en el SEV 30, en el cual se alcanzan hasta 300 m de conglomerados, gravas y arenas. (Figura 6.12).

La zona productiva, descrita como buena, se observo en zonas aisladas, una en el área central en aluvión y la otra en roca volcánica fisurada y/o en depósitos granulares.

Las rocas volcánicas terciarias de composición variada (riolíticas, dacíticas y andesíticas) de estructura masiva, es demarcada como zona de producción pobre, debido al escasa alteración y fracturamiento de estas rocas. De producción intermedia a buena se identifico rocas volcánicas alteradas y fisuradas con profundidades mayores a 200 m.

#### **6.4 Modelo Conceptual**

A partir de la información obtenida de los SEVs se construyo un modelo geológico conceptual para la zona investigada del Valle y de acuerdo con estas tendencias es evidente reconocer las unidades con potencial acuífero; así como su profundidad y espesor estimado a partir de los perfiles geoelectricos. En este modelo se presentan siete unidades geológicas las cuales se describen a continuación de la base al techo.

Unidad basal (E), constituida por rocas volcánicas Terciarias de composición intermedia a básica; componen el basamento hidrogeológico del área en estudio debido que presentan altas resistividades, asociándose con una unidad de baja conductividad hidraulica, de acuerdo a la profundidad de investigación de los SEVs realizados en dicha zona; como se aprecia en la Figura 6.16, se encuentra aflorando al

este en la Sierra de Pitos, al oeste en la Sierra de Tezontlalpan y en el valle se encuentra a profundidades de hasta 300 m, tiene un espesor mayor a los 400 metros, como ya se ha mencionado, debido a sus características de alta resistividad, no presenta condiciones acuíferas favorables.

Cuando esta roca se intemperiza y/o se fractura, sus resistividades disminuyen y se le identifica como unidad (E), se distribuye en la parte central del valle debido a que los flancos de la Sierra de Pitos y de Tezontlalpan son cortados por fallas normales, las cuales dieron origen a fosas y pilares. Estas estructuras tectónicas son relacionadas genéticamente con efectos distensivos, posterior a los compresivos que ejerció la Placa de Cocos con el Eje Neovolcánico. Desde el punto de vista hidrogeológico es muy importante debido a que cuando se encuentra fracturado y/o alterado presenta condiciones favorables para la circulación del agua subterránea.

La siguiente unidad que suprayace a las rocas volcánicas de edad Terciaria; se encuentra constituida por brechas volcánicas de composición intermedia; se distribuyen en todo el valle, se encuentra rellenando bloques que se hundieron por la distensión de la tectónica; el espesor de esta unidad es variable, no mayor a los 100 m. Desde el punto de vista hidrogeológico las unidades E y E2 presentan resistividades y espesores favorables para la circulación de agua subterránea y corresponden al acuífero fracturado ( Huizar 1993).

Las unidades del Cuaternario (A, A2, B, C, D) constituidas por sedimentos aluviales intercalados con material volcánico; formando una extensa planicie que rellena en su totalidad al graben de norte a sur; esta unidad alcanza su máximo espesor en la parte central del valle de aproximadamente 250 m; disminuyendo hacia el pie de monte de ambas sierras.

De este conjunto de unidades como los conglomerados (C), arenas y gravas (B), y tobas arenosas (A2) con resistividades variables (20- 250  $\Omega m$ ), por lo cual presenta condiciones acuíferas favorables para el flujo de agua subterránea formando el acuífero granular (Huizar, 1993).

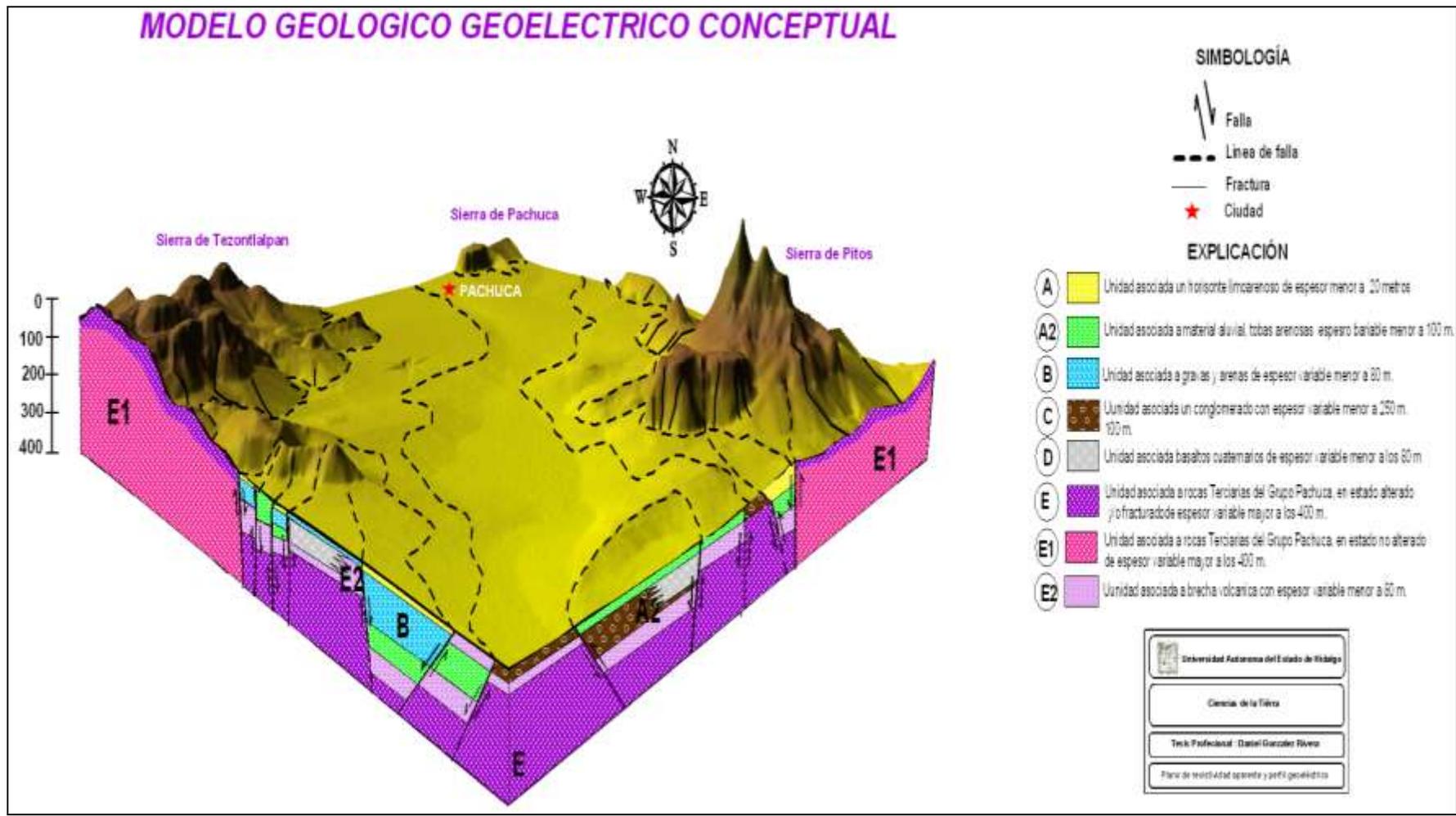


Figura 6.13. Modelo Conceptual geológico- geoelectrico.

# Capítulo 7

---

## 7.1. CONCLUSIONES

Los métodos eléctricos (dispositivo Schlumberger) con un amplio poder resolutivo sobre la localización de fuentes potenciales de agua subterránea en valles aluviales resultaron ser métodos económicos en comparación con la exploración directa del subsuelo (perforación de pozos).

El método eléctrico además de permitir la identificación de zonas potenciales de agua subterránea, permite mapear el basamento impermeable, geometría del acuífero así como las unidades geológicas del subsuelo.

Por medio de una serie de 31 SEVs realizados en el Valle Pachuca-Tizayuca, se logró una profundidad de investigación de 330 metros.

Las curvas tipo obtenidas en el Valle Pachuca Tizayuca definieron familias de curvas de acuerdo a la frecuencia con que estas se repiten; dominando principalmente: KH, HAK, HA, QHA, KH, AK, HAK, HA, QHA, el resto de las curvas se presentaron minoritariamente, esto no quiere decir que sean de buen potencial acuífero, sino que reflejan una discontinuidad en la resistividad eléctrica.

Se denota que las curvas que incluyen en su morfología una curva de tipo HK son esencialmente de buen potencial acuífero,

Basados en la caracterización geoelectrica se definieron dos principales acuíferos; uno granular, formado por capas de conglomerados (35 a 300  $\Omega\text{m}$ ), arenas y gravas (35 a 135  $\Omega\text{m}$ ) y tobas arenosas de (32 a 257  $\Omega\text{m}$ ). Otro fracturado, compuesto por rocas terciarias alteradas y/o fracturadas con resistividades de 94 hasta 814  $\Omega\text{m}$ .

Las zonas productivas se han identificado en material granular y fisurado, localizados en la parte central y en las cercanías del pie de monte de las serranías, al oeste (Acayuca, Tolcayuca) y principalmente al noreste (Telles, Villa de Tezontepec) del área de estudio, en donde se tienen espesores de hasta 300 m.

Se identificaron zonas de baja resistividad ( $10 \Omega m$ ), asociadas a paquetes arcillosos poco favorables para el flujo de agua subterránea, debido a su baja permeabilidad.

Se identificó el basamento hidrogeológico en el centro del valle formado por rocas volcánicas terciarias con escasa alteración y fracturamiento con altas resistividades mayores a  $900 \Omega m$ , a profundidades de hasta 300 m.

## **7.2. RECOMENDACIONES**

Basados en los resultados obtenidos en el presente estudio se recomienda a las autoridades responsables del abastecimiento del agua subterránea, considerar la etapa de exploración directa en los sitios con mayor potencial señalados en el presente estudio (SEVs 9, 23, 12, 16, 23, 27, 28, 30).

Se recomienda realizar exploraciones más profundas utilizando equipos con mayor capacidad de penetración del subsuelo o con otros métodos como los magnetoteléuticos o electromagnéticos.

Desde el punto de vista hidrogeológico no es recomendable cimentar unidades habitacionales dentro de la planicie ni en los flancos de ambas sierras (Tezontlalpan y Pitos), ya que afectara de manera directa al acuífero, limitando la recarga de este, provocando un déficit en el abastecimiento a las ciudades de Pachuca y de México, por lo tanto los costes de exploración, perforación, extracción, red hidráulica y suministro a la población, drásticamente aumentarían.

Por ello es importante cuidar el agua, tomando un buen uso y en lo posible reciclarla, con el fin de asegurar el mantenimiento y calidad de este recurso que es vital para la supervivencia de los seres vivos que habitan la Tierra, nuestro Planeta.

## 7.3. BIBLIOGRAFÍA

---

Alicia Favetto, et al. 2005. Estudio Geofísico aplicado a la evaluación del recurso geotermal en el sudeste de Entrerios. Revista de la Asociación Geológica Argentina. Vol. 60 (1), pp. 197-206.

Astier, J.L., 1982. Geofísica Aplicada ala Hidrogeología, Segunda edición, Ediciones Paraninfo, S.A., Madrid España, pp. 40-182.

Cantagrel, J. M. and C. Robin, 1979. K-Ar Dating on Eastern Mexican Volcanic Rocks-Relations between the Andesitic and Alkaline Provinces. J. Vol. Geothermal Res., 5, pp. 99-114.

Cantos F. J., 1984. Tratado de Geofísica Aplicada.Litoprint. Madrid España, p. 394-410.

Comisión Nacional del Agua (CNA), 2002. Disponibilidad de aguas subterráneas en el acuífero de Cuautitlán-Pachuca, Estado de México e Hidalgo. Gerencia de Aguas Subterráneas, pp. 17.

Consejo de Recursos Minerales, 1992. Monografía Geológico Minera del estado de Hidalgo. Centro Minero, p. 1-30.

Consejo de Recursos Minerales, 1996. Monografía Geológico Minera del estado de México. Centro Minero, p. 42-45.

Consorsio Guaraní. 2006. Tecnicas geofísicas terrestres aplicables al estudio del SAG y guía básica de datos regionales. Proyecto para la protección ambiental y desarrollo sostenible del sistema acuífero Guaraní, p. 19-49.

E. Martinho, T. Almendio.2006. Behaviour of contamination in land fill sites using 2D Resistivity/IPimaging: case studies in Portugal. Springer-Verlag. Enviromental Geology 49: pp. 1071-1078.

Evjen, H. M., 1938, Depth factor and resolving power of electrical measurements: Geophysics, 3, pp. 78–95.

Flathe H (1963) Five-layer master curvets for the hydrogeologicalinterpretation of geoelectric resistivity measurements in anaquifer. Geophys Prosp 11, pp. 471–508

Fries, C. Jr., 1960. Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central y meridional de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. Bol, 60, pp. 236.

Fries, C. Jr., 1962. Hoja Pachuca 14Q-e(11), con resumen de la hoja Pachuca, estados de Hidalgo y México, Carta Geológica de México, Serie de 1:100000, mapa con texto al reverso, Instituto de Geología, UNAM, México.

Geofísica y perforaciones del medio ambiente S.C. 1999. Estudio de prospección geoelectrica en la granja Kadabanchel municipio de Tolcayuca, Hidalgo. En: Comisión Nacional del Agua (CNA), Gerencia Estatal de Hidalgo. Reporte Técnico BOO.E.11.3/IHNC/SUB/209, p. 28.

Geyne, A. R, Fries Jr.; Segerstrom, Kenneth; Black, R. F. y Wilson I.F.; 1963, Geología y Yacimientos Minerales del Distrito Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, México, publicación 5E del Consejo de Recursos no Renovables, pp. 222.

Ghost, D.P., 1971. The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements: Geophysical Prospecting, pp. 192-217.

Hamzah U., et al. 2007. Groundwater investigation in Kuala Selangor using vertical electrical sounding (VES) surveys. Springer-Verlag. Environmental Geology 51, pp. 1549-1359.

Herrera. R. I., et al. 1989. El sistema Acuífero de la Cuenca de México. Instituto de Geofísica. UNAM. Ingeniería Hidráulica en México. pp 60-66.

Huízar-Álvarez R., 1993. Carta Hidrogeológica de la Cuenca del Rio de las Avenidas, de Pachuca Hidalgo, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. Volumen 27. No 2, p. 95-110.

Huizar-Alvarez R., Hernández G., Carillo-Martinez M., Carillo-Rivera J.J., Hergt T., Ángeles G., 2003. Geologic structure and groundwater flow in the Pachuca-Zumpango sub-basin, central Mexico. Springer-Verlag. Environmental Geology 43, pp. 385-399.

Huntley, D., 1986. Relations between permeability and electrical resistivity in granular aquifers. Ground Water, 24, pp. 466-474.

Iakubovskii Iu. V., y Liajov L.L., 1980, Exploración Eléctrica, Barcelona, Reverté, p. 408.

INEGI 1971, F14D81- Carta de aguas superficiales escala 1: 250000.

Imhof L. A, et al. 2002. Aplicación del método geoelectrico para la determinación de horizontes salinos en la colonia Lloveras-Pcia de San Juan-Argentina. Revista Brasileira de Geofísica, vol 19 (3), pp. 263-278.

Koefoed, O., 1979. Geosounding Principles 1: Resistivity sounding measurements. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.

Ledezma-Guerrero, O., 1987. Hoja Calpulalpan 14Q-h(3), con resumen de la geología de la Hoja Calpulalpan, estado de Hidalgo, México y Tlaxcala, Instituto de Geología, UNAM, Carta Geológica de México, serie de 1: 100000 mapa secciones y texto, pp 12.

Lugo H. J., 1984. Geomorfología del Sur de la Cuenca de México. Serie varia T1, núm. 18, Instituto de Geografía.

Marín, C., 1986. Sistemas mayores de fallamientos en la Cuenca de México. VIII Conv. Nacional Soc. Geol. Mexicana, Mem. Resúmenes, pp. 209-212.

Marín, C., IV.6.3 Hidrogeología. Naturaleza. Tomo II, 6. Instituto de Geografía, UNAM, Mem. Atlas Nacional de México, mapa escala 1:4000 000.

Milton B. Dorbin. 1975. Introducción a la Prospección Geofísica. Ediciones Omega, S.A., p. 412.

Mooney, H. M., and Wetzel, W. W., 1956, The potentials about a point electrode and apparent resistivity curves for a two, three- and four-layer earth: Mineapolis, UniversCcy of Minnesota Press.

Mooser, F., 1962. Bosquejo geológico del extremo sur de la Cuenca de México, México. Secretaria de Recursos Hidráulicos, C.H.C.V.M., p. 99.

Mooser, F., 1975. Historia geológica de la Cuenca de México, en memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal, Tomo 1, Depto. del Distrito Federal, México, pp. 7-38 y mapa geológico.

Muskal, M and Evinger, M. H;1941. Current Penetration in D.C Prospecting Geophysics. Vol.6, pp. 297-427.

Navarro Leon I. 2006 Explotación y renovabilidad del agua subterránea en una cuenca Semiarida del Altiplano Mexicano. Ciencia UANL,. Vol. IX, Núm. 4, pp. 375-382.

Orellana E., 1972. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua, Madrid, Paraninfo, p. 578.

Orellana E, H. M. Mooney., 1966. Tablas y curvas patrón para sondeos eléctricos verticales sobre terrenos estratificados. Interciencia Madrid.

Raíz, Z. E., 1664. Landforms of México. Cambridge, Mass. Second Edition, mapa contexto, escala aprox. 1:3 000 000.

Ramos-Leal J. A. 1996., Parámetros estructurales que controlan la hidrodinámica de las aguas subterráneas en el área de Zimapan Hgo. Tesis Profesional UNAM, p. 65.

Ramos-Leal J. A., et al. 2007., Sucesión de eventos y geometría de la parte central del acuífero del graben de Villa de Reyes (San Luis Potosí, México) inferida a partir de datos geoeléctricos. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 24, Núm. 1, p. 31-46.

Reyes-Gutiérrez L.R. 1990. Estudio geofísico de la distribución de cavernas en el poblado de Real del Monte Hgo. México Tesis profesional. ESIA-IPN, p. 123.

Rodríguez C. y C. Ochoa A. 1989. Estudio Geoeléctrico del sistema acuífero de la Cuenca del Valla de México. Revista de la Unión Geofísica Mexicana. Vol 28. Núm 2, pp. 191-207.

Roman, I. 1934, Some interpretation of earth resistivitydata: AIME Trans., V. 110, pp. 183-200.

Roy, A., and A. Apparao, 1971, Depth of investigation in directcurrent methods: Geophysics, 36, pp. 943–959.

Sánchez-Rubio, 2001. Evolución geológica y geomorfología del complejo dómico Los Pitos, norte de José Juan Zamorano-Orozco, Luis Miguel Tanarro-García, José Lugo-Hubp y Gerardo la Cuenca de México. Revista Mexicana de Ciencias geológicas. V. 1, pp. 66-79.

SARH, 1973-1988. Comisión Hidrológica del Valle de México, Boletín Hidrogeológico, Núm. 25-40.

SARH, 1987. Perfiles Geofísicos en Pachuca-Zempoala, Emiliano Zapata-Apan, Teotihuacan-Tepexpan, Otumba-CD Sahagún en el Valle de México, Secretaria de Recursos Hidráulicos, Comisión de Aguas del Valle de México, Dirección General de Estudios y Evaluación, pp. 43.

Scerna, Z.1987. Estructura geológica, gravimétrica, sísmica y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México, Boletín, núm. 104, Instituto de Geología, UNAM, México, pp. 76.

Serrano, F. 1995 Dictamen geohidrológico de Tolcayuca, Hidalgo. En: Comisión Nacional del Agua (CNA), Gerencia Estatal de Hidalgo. Reporte Técnico BOO.E.11.3/IHNC/SUB/081, p. 11.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). Carta Geológica Minera F14-11, Estado de Hidalgo; escala 1:5000,000.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). Carta Geológica Minera E14-2, Ciudad de México, escala 1:5000,000.

Sree Devi P.D., Srinivasulu S., Kesava K. Raju, 2001. Delineation of groundwater potential zones and electrical resistivity studies for groundwater exploration. Springer-Verlag. Environmental Geology V. 40, pp. 1252-1264.

Stefanescu S.S 1930. Sur la distribution électrique autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales homogènes et isotropes. Le Journal de Physique et le Radium, 7, series 1.

Susan S. Cavalcanti, Hedison K. Sato & Oliver A. L Lima, 2002. Geofísica eléctrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do Aterro Metropolitano, Centro Salvador, Bahia. Brazilian Journal of Geophysics, vol 19 (2). Pp 166-168.

Tapia-Varela, G., y López-Blanco, J., 2001. Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogénicas a escala 1:100,000. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. V. 19, Núm. 1, pp. 50-65.

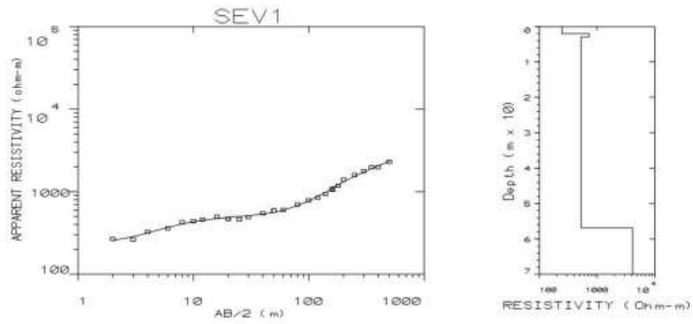
Vázquez, E. y Jaimes R.,1989. Geología de la Cuenca de México. Instituto de Geofísica UNAM.

Seegerstrom, K., 1962. Geology of south-central Hidalgo and northeastern Mexico: United States Geological Survey, Bulletin, 1104-C, pp. 87-162.

## **ANEXO A**

**Modelo de capas resistivas,  
curvas de campo, teórica y  
arreglo Schlumberger.**

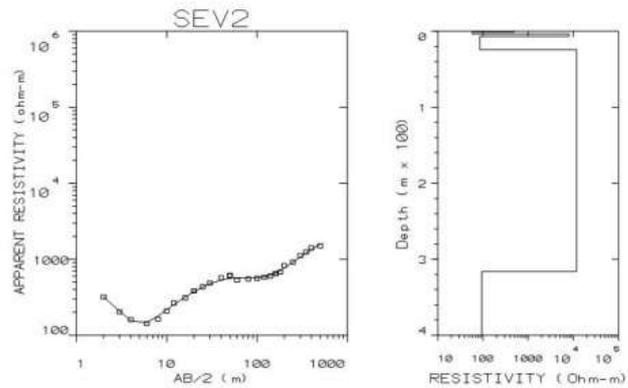
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	267.8
2	3	1	265
3	4	1	327.6
4	6	1	360.6
5	8	1	428
6	10	1	440
7	12	1	460
8	16	5	497
9	20	5	470
10	25	5	463
11	30	5	490
12	40	5	548.5
13	50	20	592.2
14	60	20	604
15	80	20	700
16	100	20	788
17	120	20	850
18	140	20	940
19	160	50	1058
20	180	50	1183
21	200	50	1406
22	250	50	1600
23	300	50	1769
24	350	50	1986
25	400	50	1980
26	500	50	2305



**AA**

ERROR %:	4.21				
LAYER #:	1	2	3	4	
"R <sub>o</sub> " (Ohm m):	245.38	733	530	4124	
DEPTH(m):	2.03	2.95	56.82	-IEND-	
THICKNESS(m):	2.03	0.91	53.87	-IEND-	

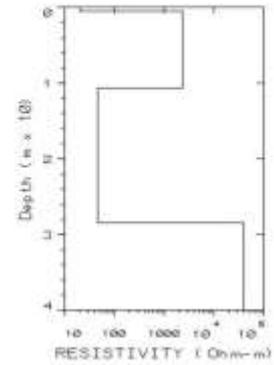
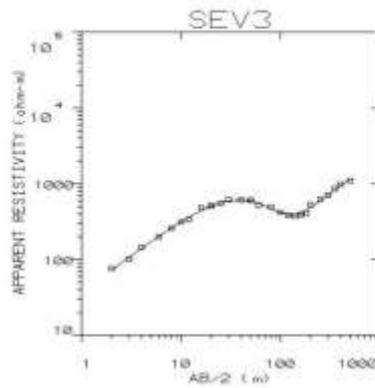
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	317.6
2	3	1	203
3	4	1	160
4	6	1	120
5	8	1	142
6	10	1	185
7	12	1	255.3
8	16	5	289
9	20	5	380
10	25	5	424
11	30	5	500
12	40	5	498
13	50	20	610
14	60	20	547
15	80	20	550
16	100	20	555
17	120	20	560
18	140	20	580
19	160	50	600
20	180	50	630
21	200	50	893
22	250	50	920
23	300	50	1112
24	350	50	1320
25	400	50	1404
26	500	50	1591



**HKHK**

ERROR %	4.6					
LAYER #:	1	2	3	4	5	6
"R <sub>o</sub> " (Ohm m):	486.1	57.1	8000.	84.62	1179	94.04
DEPTH(m):	1.18	3.49	6.68	24.02	316.13	-IEND-
THICKNESS(m):	1.18	2.3	3.18	17.34	29.21	-IEND-

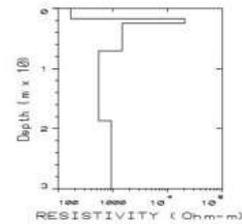
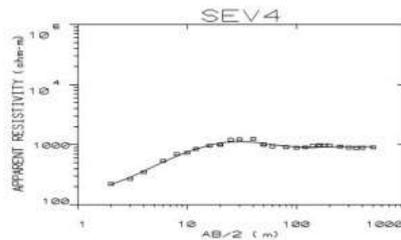
ESTACIÓN	AB/ 2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	76.3
2	3	1	101.8
3	4	1	145
4	6	1	200
5	8	1	260
6	10	1	313
7	12	1	340
8	16	5	480
9	20	5	510
10	25	5	555
11	30	5	615
12	40	5	610
13	50	20	605
14	60	20	527
15	80	20	495
16	100	20	420
17	120	20	385
18	140	20	375
19	160	50	393
20	180	50	413
21	200	50	530
22	250	50	623
23	300	50	713
24	350	50	865
25	400	50	989
26	500	50	1102



**KH**

ERROR %:	4.54			
LAYER #:	1	2	3	4
"R <sub>o</sub> " (Ohm m):	20.2	2377.15	46.42	4010
DEPTH(m):	0.53	10.66	28.45	-END-
THICKNESS(m):	0.53	10.13	17.78	-INF-

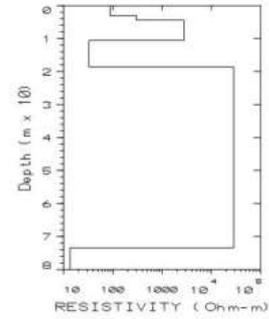
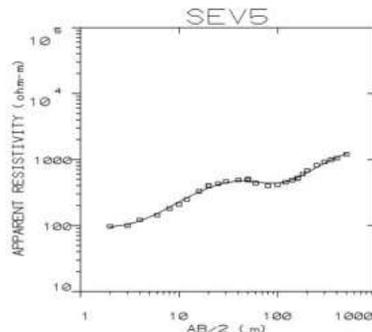
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	222
2	3	1	270
3	4	1	350
4	6	1	535
5	8	1	694
6	10	1	735
7	12	1	850
8	16	5	960
9	20	5	1000
10	25	5	1200
11	30	5	1225
12	40	5	1250
13	50	20	1000
14	60	20	935
15	80	20	906
16	100	20	888
17	120	20	900
18	140	20	950
19	160	50	960
20	180	50	975
21	200	50	970
22	250	50	929
23	300	50	892
24	350	50	880
25	400	50	890
26	500	50	222



**KQH**

ERROR %:	5.57				
LAYER #:	1	2	3	4	5
"R <sub>o</sub> " (Ohm m):	167.75	2063	1474.7 1	546	933.7
DEPTH(m):	1.68	2.47	7.06	18.68	-END-
THICKNESS(m):	1.68	0.76	4.58	11.62	

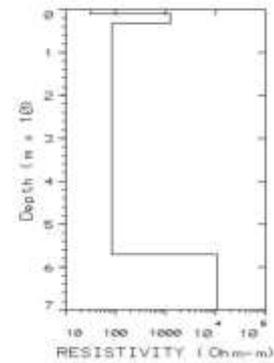
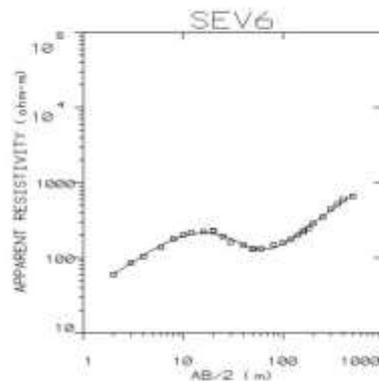
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	900
2	3	1	97
3	4	1	100
4	6	1	122
5	8	1	143
6	10	1	180
7	12	1	209
8	16	5	248
9	20	5	330
10	25	5	400
11	30	5	430
12	40	5	465
13	50	20	490
14	60	20	505
15	80	20	440
16	100	20	400
17	120	20	415
18	140	20	451
19	160	50	487
20	180	50	520
21	200	50	600
22	250	50	680
23	300	50	820
24	350	50	920
25	400	50	995
26	500	50	1050



**AKHK**

ERROR %:	5.01					
LAYER #:	1	2	3	4	5	6
"Ro" (Ohm m):	87.9	299.	2744.2	32.7	2834	13.53
DEPTH(m):	3.1	4.4	10.57	18.6	73.43	-
THICKNESS (m):	3.1	1.31	6.16	8.07	54.78	
						-END-

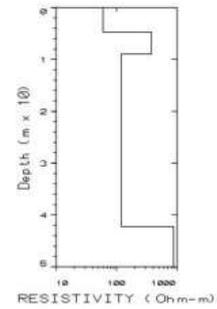
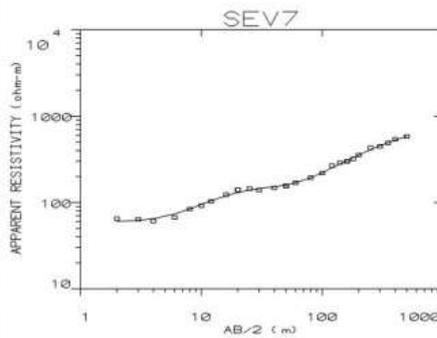
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	60
2	3	1	86
3	4	1	104
4	6	1	137
5	8	1	180
6	10	1	203
7	12	1	218
8	16	5	224
9	20	5	229
10	25	5	191
11	30	5	162
12	40	5	147
13	50	20	130
14	60	20	133
15	80	20	149
16	100	20	160
17	120	20	176
18	140	20	199
19	160	50	225
20	180	50	249
21	200	50	287
22	250	50	350
23	300	50	446
24	350	50	523
25	400	50	600
26	500	50	659



**KH**

ERROR %:	5.20			
LAYER #:	1	2	3	4
"Ro" (Ohm m):	30.70	1243	484.31	1082
DEPTH(m):	0.976	3.12	57.07	-END-
THICKNESS (m):	0.976	2.24	53.86	

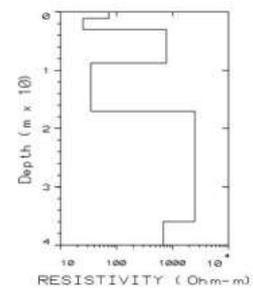
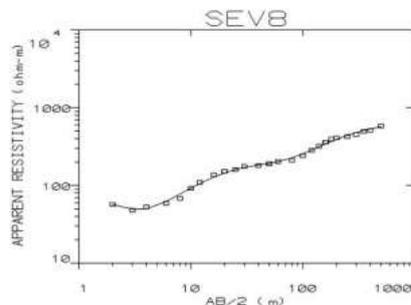
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	65
2	3	1	64
3	4	1	61
4	6	1	67
5	8	1	64
6	10	1	92
7	12	1	103
8	16	5	123
9	20	5	140
10	25	5	145
11	30	5	139
12	40	5	148
13	50	20	155
14	60	20	169
15	80	20	194
16	100	20	219
17	120	20	267
18	140	20	289
19	160	50	300
20	180	50	320
21	200	50	353
22	250	50	428
23	300	50	447
24	350	50	490
25	400	50	539
26	500	50	580



**KH**

ERROR %:	4.11			
LAYER #:	1	2	3	4
"Ro" (Ohm m):	59.52	377.61	118.71	872
DEPTH(m):	4.67	8.96	42.20	-END-
THICKNESS(m):	4.67	4.28	33.24	-

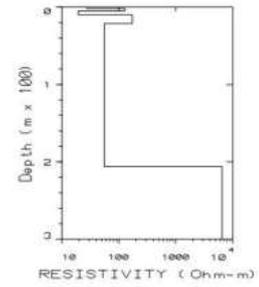
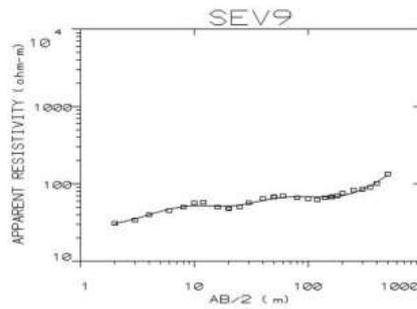
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	57
2	3	1	48
3	4	1	53
4	6	1	59
5	8	1	68
6	10	1	92
7	12	1	110
8	16	5	137
9	20	5	152
10	25	5	160
11	30	5	176
12	40	5	180
13	50	20	190
14	60	20	202
15	80	20	210
16	100	20	241
17	120	20	284
18	140	20	320
19	160	50	360
20	180	50	395
21	200	50	410
22	250	50	425
23	300	50	452
24	350	50	496
25	400	50	510
26	500	50	580



**QKHA**

ERROR % c	4.9					
LAYER #:	1	2	3	4	5	6
"Ro" (Ohm m):	72.86	25.12	776.79	34.64	2498.5	682.6
DEPTH(m):	1.10	2.96	8.75	16.99	35.95	-
THICKNESS(m):	1.10	1.80	5.78	8.24	18.96	-

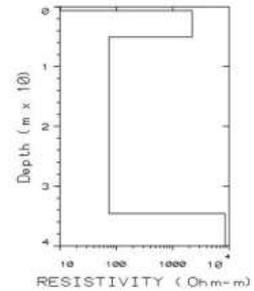
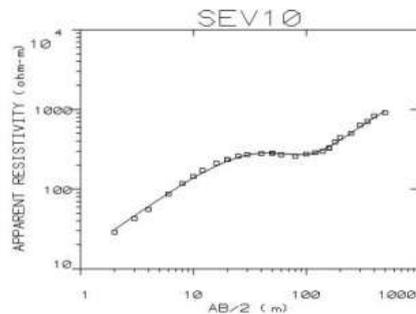
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	31
2	3	1	34
3	4	1	40
4	6	1	45
5	8	1	50
6	10	1	57
7	12	1	58
8	16	5	50
9	20	5	48
10	25	5	50
11	30	5	57
12	40	5	65
13	50	20	68
14	60	20	70
15	80	20	66
16	100	20	64
17	120	20	62
18	140	20	66
19	160	50	68
20	180	50	70
21	200	50	76
22	250	50	83
23	300	50	86
24	350	50	90
25	400	50	101
26	500	50	134



**KHKH**

ERROR %:	5.46					
LAYER #:	1	2	3	4	5	6
"R <sub>0</sub> " (Ohm m):	27.37	128.03	19.37	172	55.29	6532
DEPTH (m):	1.98	4.52	9.94	25.35	206	-
THICKNESS (m):	3.1	1.31	6.16	8.07	54.78	
						-END-

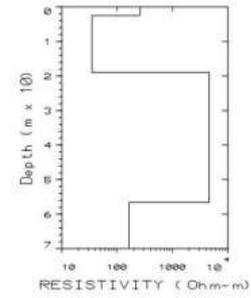
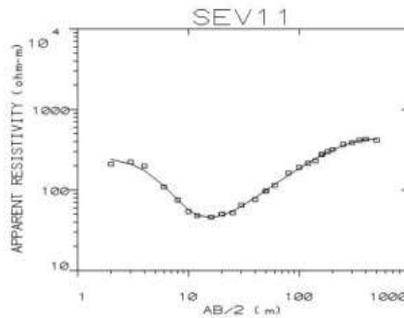
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	29
2	3	1	42
3	4	1	55
4	6	1	87
5	8	1	118
6	10	1	144.6
7	12	1	172
8	16	5	212
9	20	5	235
10	25	5	260
11	30	5	271
12	40	5	280
13	50	20	283
14	60	20	270
15	80	20	260
16	100	20	276
17	120	20	287
18	140	20	298
19	160	50	328
20	180	50	391
21	200	50	445
22	250	50	500
23	300	50	637
24	350	50	787
25	400	50	828
26	500	50	910



**KH**

ERROR %:	4.83			
LAYER #:	1	2	3	4
"R <sub>0</sub> " (Ohm m):	10.22	2227	74.4	8495
DEPTH (m):	0.64	5.05	34.6	-END-
THICKNESS (m):	0.64	4.41	29.54	

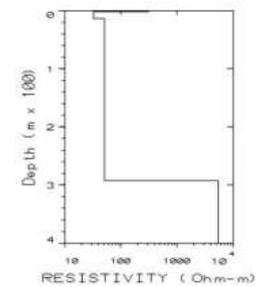
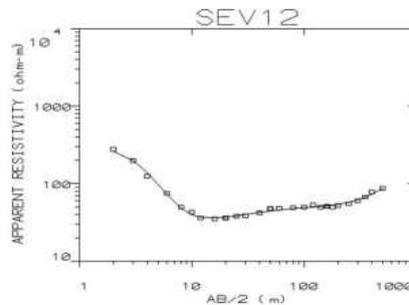
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	210
2	3	1	223
3	4	1	198
4	6	1	109
5	8	1	75
6	10	1	54
7	12	1	48
8	16	5	46
9	20	5	50
10	25	5	52
11	30	5	65
12	40	5	76
13	50	20	97
14	60	20	114
15	80	20	163
16	100	20	190
17	120	20	215
18	140	20	230
19	160	50	276
20	180	50	299
21	200	50	317
22	250	50	368
23	300	50	386
24	350	50	414
25	400	50	427
26	500	50	414



**HK**

ERROR %:	4.98			
LAYER #:	1	2	3	4
"R <sub>o</sub> " (Ohm m):	258.5	34.9	4060	1603
DEPTH(m):	2.47	18.98	56.62	-END-
THICKNESS (m):	2.47	16.51	37.63	

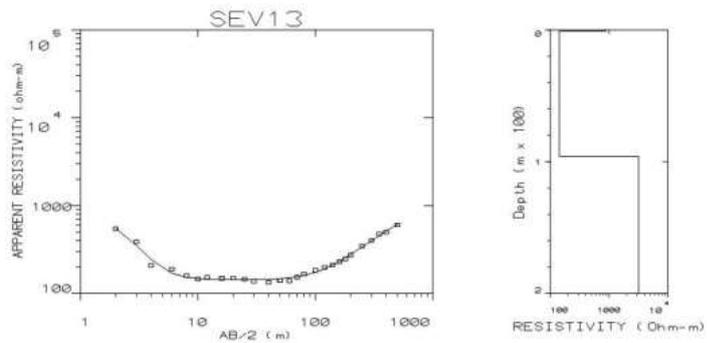
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	278
2	3	1	198
3	4	1	125
4	6	1	75
5	8	1	50
6	10	1	43
7	12	1	36
8	16	5	35
9	20	5	36
10	25	5	38
11	30	5	42
12	40	5	47
13	50	20	48
14	60	20	49
15	80	20	50
16	100	20	53
17	120	20	50
18	140	20	51
19	160	50	50
20	180	50	52
21	200	50	55
22	250	50	60
23	300	50	67
24	350	50	78
25	400	50	87
26	500	50	278



**QA**

ERROR %:	4.62			
LAYER #:	1	2	3	4
"R <sub>o</sub> " (Ohm m):	314.9	32.4	50	5439.3
DEPTH(m):	1.77	13.6	292	-END-
THICKNESS (m):	1.77	11.8	37.6	

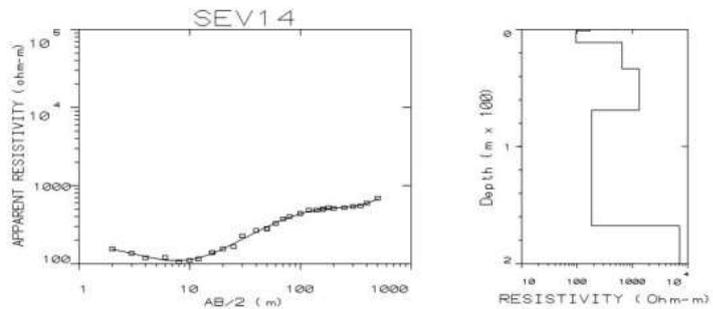
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	545
2	3	1	387
3	4	1	209
4	6	1	189
5	8	1	160
6	10	1	146
7	12	1	153
8	16	5	149
9	20	5	150
10	25	5	145
11	30	5	138
12	40	5	134
13	50	20	140.2
14	60	20	139.1
15	80	20	153.2
16	100	20	167.3
17	120	20	183.4
18	140	20	197.6
19	160	50	211
20	180	50	230
21	200	50	247.5
22	250	50	275
23	300	50	346
24	350	50	401
25	400	50	478
26	500	50	500



**H**

ERROR %:	5.10		
LAYER #:	1	2	3
"R <sub>o</sub> " (Ohm m):	868,8	142.4	3181
DEPTH(m):	1.23	95.7	-END-
THICKNESS (m):	1.23	94.8	

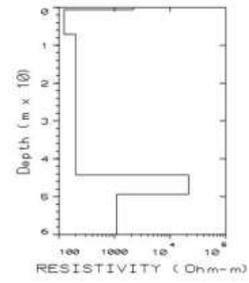
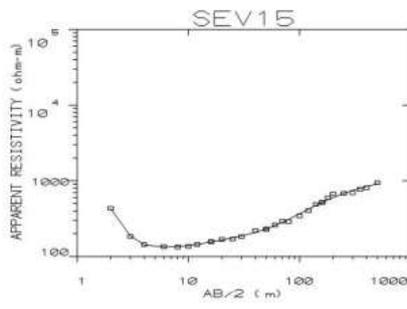
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	155
2	3	1	135
3	4	1	118.8
4	6	1	120
5	8	1	106
6	10	1	110
7	12	1	115
8	16	5	139
9	20	5	154.7
10	25	5	164.8
11	30	5	226.2
12	40	5	266.2
13	50	20	280
14	60	20	327
15	80	20	373.8
16	100	20	399.6
17	120	20	438.5
18	140	20	485
19	160	50	485
20	180	50	500
21	200	50	520
22	250	50	510
23	300	50	523
24	350	50	540
25	400	50	550
26	500	50	597



**HAKH**

ERROR %:	3.73					
LAYER #:	1	2	3	4	5	6
"R <sub>o</sub> " (Ohm m):	172.7	95.4	655.2	1325.1	182.7	7113
DEPTH(m):	1.35	11.14	33.5	69.1	167.6	-END-
THICKNESS (m):	1.35	9.7	22.4	35.5	98.5	

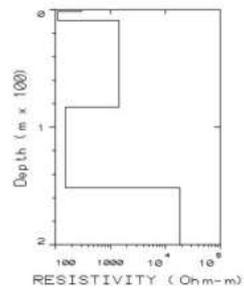
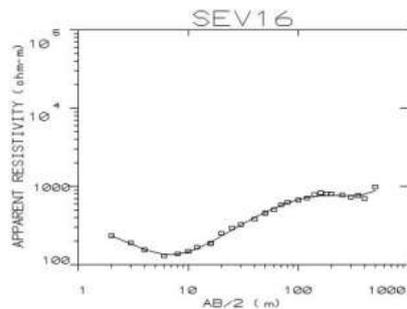
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	432.3
2	3	1	184.2
3	4	1	143.5
4	6	1	135
5	8	1	133
6	10	1	136
7	12	1	144.6
8	16	5	157
9	20	5	168.6
10	25	5	170
11	30	5	183
12	40	5	220
13	50	20	230
14	60	20	261
15	80	20	292
16	100	20	288
17	120	20	345
18	140	20	404
19	160	50	487
20	180	50	520
21	200	50	598
22	250	50	673
23	300	50	684
24	350	50	697
25	400	50	771
26	500	50	809



**HAK**

ERROR %:	4.11				
LAYER #:	1	2	3	4	5
"R <sub>o</sub> " (Ohm m):	2194.6	123.5	200.4	2154	1082
DEPTH(m):	0.61	7.1	44.2	49.3	-END-
THICKNESS(m):	0.61	6.46	37.2	5.1	

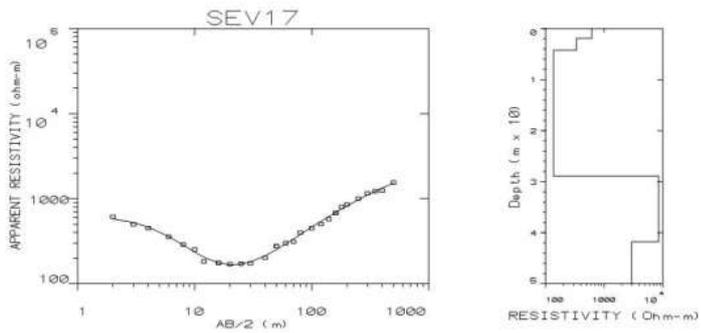
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	235
2	3	1	189.7
3	4	1	155.3
4	6	1	130
5	8	1	130
6	10	1	148
7	12	1	167
8	16	5	187
9	20	5	252
10	25	5	294
11	30	5	325
12	40	5	282
13	50	20	454
14	60	20	504
15	80	20	583
16	100	20	627
17	120	20	669
18	140	20	709
19	160	50	786
20	180	50	827
21	200	50	805
22	250	50	805
23	300	50	777
24	350	50	730
25	400	50	765
26	500	50	700



**HKH**

ERROR %:	5.10				
LAYER #:	1	2	3	4	5
"R <sub>o</sub> " (Ohm m):	300.1	109.8	1431	151	1837
DEPTH(m):	1.19	8.92	82.8	151.5	-END-
THICKNESS(m):	1.19	7.73	73.9	68.3	

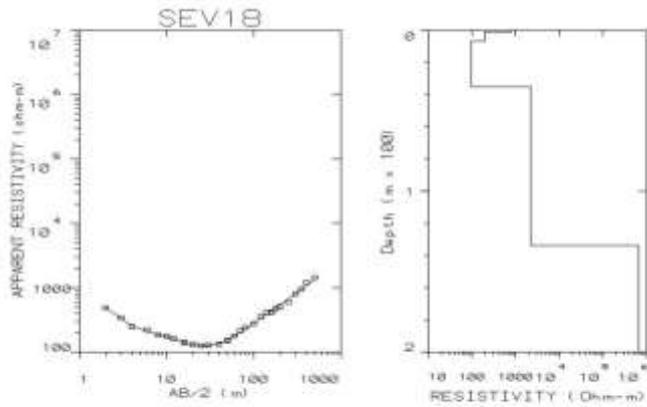
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	611
2	3	1	500
3	4	1	451
4	6	1	356
5	8	1	289
6	10	1	253
7	12	1	183
8	16	5	176
9	20	5	170
10	25	5	172
11	30	5	174
12	40	5	202
13	50	20	276
14	60	20	300
15	70	20	312
16	80	20	398
17	100	20	450
18	120	20	505
19	140	50	574
20	160	50	680
21	180	50	800
22	200	50	856
23	250	50	1002
24	300	50	1156
25	350	50	1224
26	400	50	1250
27	500	50	1550



**QHK**

ERROR %:	5.2				
LAYER #:	1	2	3	4	5
"Ro" (Ohm m):	616.7	337.5	135.6	8524	2936
DEPTH(m):	1.9	4.2	28.9	41.7	-END-
THICKNESS(m):	1.9	2,3	24.6	12.8	

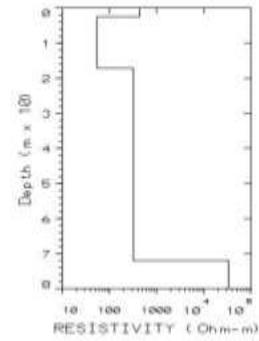
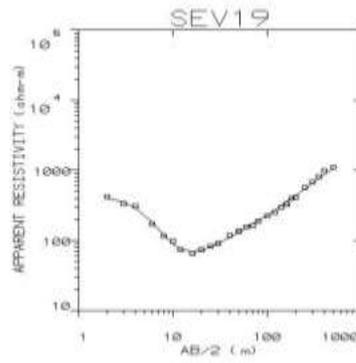
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	487.6
2	3	1	342
3	4	1	249.4
4	6	1	221.7
5	8	1	183
6	10	1	177
7	12	1	162
8	16	5	140
9	20	5	131.3
10	25	5	126.7
11	30	5	128.1
12	40	5	134
13	50	20	152
14	60	20	180
15	70	20	213
16	80	20	241
17	100	20	278
18	120	20	353
19	140	50	410
20	160	50	420
21	180	50	476
22	200	50	508
23	250	50	602
24	300	50	797
25	350	50	948
26	400	50	1207
27	500	50	1434



**QHAA**

ERROR %:	4.54					
LAYER #:	1	2	3	4	5	6
"Ro" (Ohm m):	794.1	198.5	87	228	1179	6640
DEPTH(m):	0.98	6.72	35.2	24.02	133.7	-END-
THICKNESS(m):	0.98	5.73	28.4	98.4		

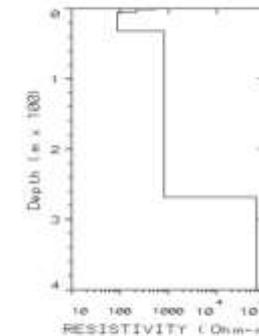
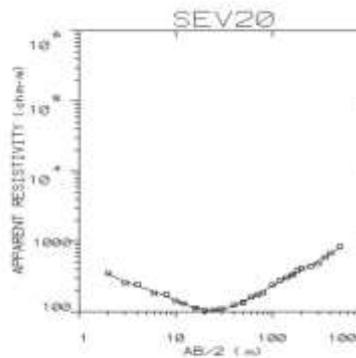
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	421
2	3	1	335
3	4	1	310
4	6	1	172
5	8	1	116
6	10	1	98
7	12	1	74
8	16	5	66
9	20	5	74
10	25	5	83
11	30	5	91
12	40	5	119
13	50	20	136
14	60	20	157
15	70	20	162
16	80	20	189
17	100	20	224
18	120	20	251
19	140	50	296
20	160	50	329.2
21	180	50	399
22	200	50	413
23	250	50	571
24	300	50	683
25	350	50	813
26	400	50	998
27	500	50	1109



**HA**

ERROR %:	5.78			
LAYER #:	1	2	3	4
"R <sub>0</sub> " (Ohm m):	439.3	54.4	322.7	3351
DEPTH (m):	2.44	17.14	71.9	-END-
THICKNESS (m):	2.44	14.7	54.8	

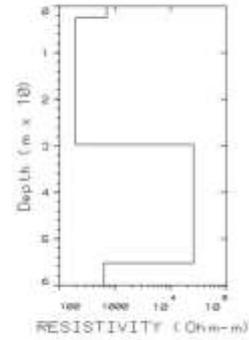
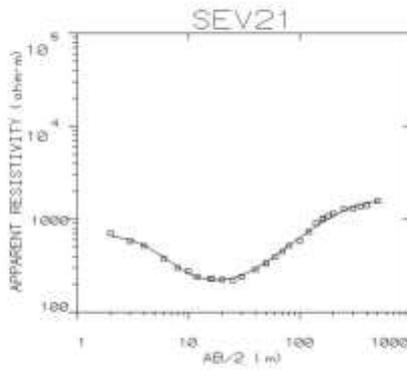
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	350
2	3	1	253
3	4	1	245
4	6	1	182
5	8	1	176
6	10	1	140
7	12	1	130
8	16	5	113
9	20	5	103
10	25	5	106
11	30	5	109
12	40	5	124
13	50	20	135
14	60	20	160
15	70	20	172
16	80	20	183
17	100	20	240
18	120	20	200
19	140	50	305
20	160	50	331
21	180	50	387
22	200	50	415
23	250	50	440
24	300	50	480
25	350	50	590
26	400	50	680
27	500	50	850



**QHA**

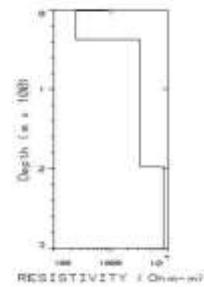
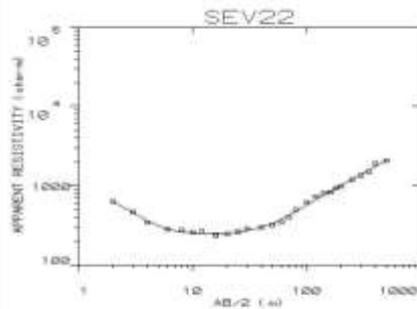
ERROR %:	4.13				
LAYER #:	1	2	3	4	5
"R <sub>0</sub> " (Ohm m):	551.5	217.2	86.9	812.2	6909
DEPTH (m):	0.76	4.47	31.57	268.3	-END-
THICKNESS (m):	0.76	3.70	27.1	236.8	

ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	704
2	3	1	577
3	4	1	518
4	6	1	380
5	8	1	300
6	10	1	276
7	12	1	238
8	16	5	229
9	20	5	223
10	25	5	220
11	30	5	241
12	40	5	287
13	50	20	335
14	60	20	387
15	70	20	448
16	80	20	519
17	100	20	587
18	120	20	732
19	140	50	897
20	160	50	1007
21	180	50	1087
22	200	50	1150
23	250	50	1287
24	300	50	1302
25	350	50	1379
26	400	50	1401
27	500	50	1567



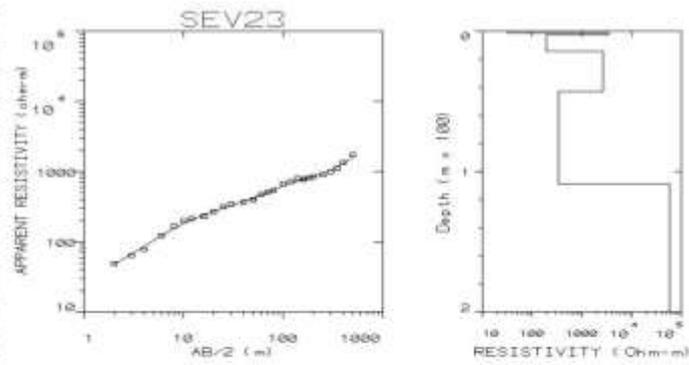
HK				
ERROR %:	4.71			
LAYER #:	1	2	3	4
" $\rho_0$ " (Ohm m):	703	195.7	2555	826.1
DEPTH(m):	2.43	29.76	55	-END-
THICKNESS(m):	2.43	27.3	25.4	

ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	631
2	3	1	467
3	4	1	345
4	6	1	283
5	8	1	276
6	10	1	260
7	12	1	265
8	16	5	238
9	20	5	245
10	25	5	263
11	30	5	289
12	40	5	299
13	50	20	320
14	60	20	348
15	70	20	400
16	80	20	498
17	100	20	623
18	120	20	734
19	140	50	809
20	160	50	824
21	180	50	932
22	200	50	980
23	250	50	1189
24	300	50	1343
25	350	50	1487
26	400	50	1904
27	500	50	2074



HA				
ERROR %:	5.13			
LAYER #:	1	2	3	4
" $\rho_0$ " (Ohm m):	673.4	241.7	3255	8471
DEPTH(m):	1.15	37.17	197.42	-END-
THICKNESS(m):	1.15	36.02	180.2	

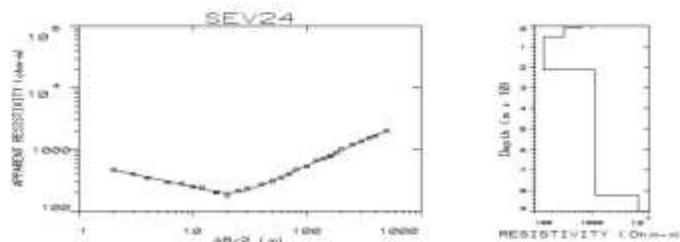
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	49
2	3	1	64
3	4	1	78
4	6	1	123
5	8	1	169
6	10	1	200
7	12	1	213
8	16	5	230
9	20	5	269
10	25	5	316
11	30	5	346
12	40	5	368
13	50	20	400
14	60	20	469
15	70	20	506
16	80	20	538
17	100	20	673
18	120	20	727
19	140	50	796
20	160	50	779.2
21	180	50	815
22	200	50	840
23	250	50	899
24	300	50	989
25	350	50	1116
26	400	50	1354
27	500	50	1739



**KHAK**

ERROR %:	5.52					
LAYER #:	1	2	3	4	5	6
"R <sub>0</sub> " (Ohm m):	32.62	3468.5	193.5	2051.7	342.03	5801
DEPTH (m):	1.4	2.6	14.39	43.05	108.89	-END-
THICKNESS (m):	1.4	1.2	11.78	28.65	65.84	

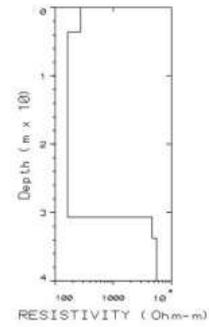
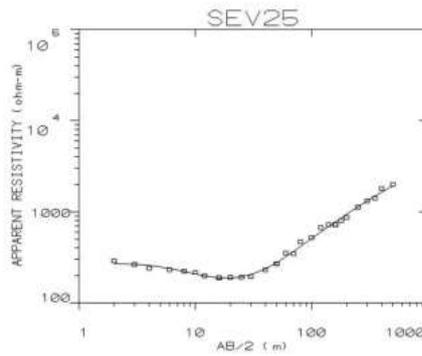
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	470
2	3	1	400
3	4	1	347
4	6	1	292
5	8	1	280
6	10	1	247
7	12	1	242
8	16	5	200
9	20	5	179
10	25	5	212
11	30	5	237.3
12	40	5	275.2
13	50	20	305
14	60	20	348
15	70	20	402
16	80	20	475
17	100	20	530
18	120	20	662
19	140	50	787
20	160	50	781
21	180	50	871
22	200	50	1014
23	250	50	1209
24	300	50	1358
25	350	50	1550
26	400	50	1662
27	500	50	2000



**QHA**

ERROR %:	3.71				
LAYER #:	1	2	3	4	5
"R <sub>0</sub> " (Ohm m):	634.35	319.11	141.26	1131	6495
DEPTH (m):	0.67	5.23	21.34	82.29	-END-
THICKNESS (m):	0.67	4.36	16.1	60.9	

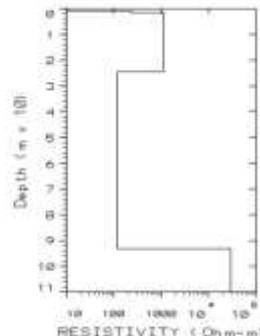
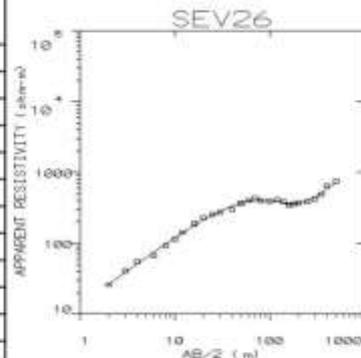
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	289
2	3	1	264
3	4	1	240
4	6	1	231
5	8	1	223
6	10	1	216
7	12	1	198
8	16	5	189
9	20	5	191
10	25	5	192
11	30	5	195
12	40	5	231
13	50	20	270
14	60	20	352
15	70	20	345
16	80	20	467
17	100	20	523
18	120	20	671.4
19	140	50	722
20	160	50	721
21	180	50	798
22	200	50	865
23	250	50	1125
24	300	50	1315
25	350	50	1407
26	400	50	1798
27	500	50	200



**AH**

ERROR %:	5.7			
LAYER #:	1	2	3	4
*R <sub>0</sub> * (Ohm m):	272.57	163.71	46.35	5547
DEPTH(m):	3.57	30	33	-END-
THICKNESS(m):	3.57	27.09	3.08	

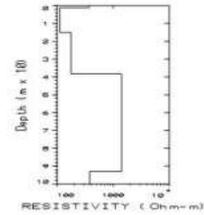
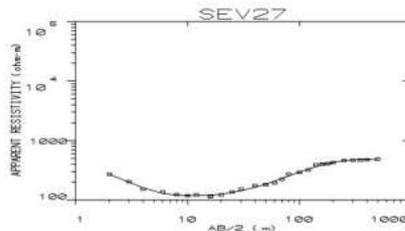
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD D (Ohm-m)
1	2	1	26
2	3	1	41
3	4	1	55
4	6	1	67
5	8	1	93
6	10	1	114
7	12	1	142
8	16	5	187
9	20	5	229
10	25	5	254
11	30	5	273
12	40	5	300
13	50	20	364
14	60	20	402
15	70	20	432
16	80	20	400
17	100	20	394
18	120	20	408
19	140	50	396
20	160	50	348
21	180	50	357
22	200	50	371
23	250	50	387
24	300	50	420
25	350	50	489
26	400	50	645
27	500	50	752



**KHK**

ERROR %:	5.56				
LAYER #:	1	2	3	4	5
*R <sub>0</sub> * (Ohm m):	10.44	231.81	116.05	118.1	2942
DEPTH(m):	0.74	1.47	24.48	93.10	-END-
THICKNESS(m):	0.74	0.73	23	68.62	

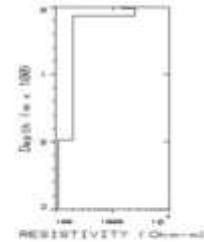
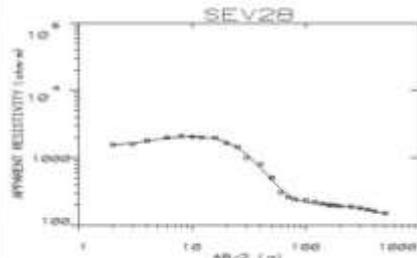
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	270
2	3	1	203
3	4	1	152
4	6	1	137
5	8	1	123
6	10	1	118
7	12	1	122
8	16	5	115
9	20	5	122
10	25	5	137
11	30	5	153
12	40	5	174
13	50	20	181
14	60	20	193
15	70	20	224
16	80	20	273
17	100	20	29
18	120	20	320
19	140	50	389
20	160	50	400
21	180	50	409
22	200	50	426
23	250	50	462
24	300	50	465
25	350	50	470
26	400	50	476
27	500	50	487



**HAK**

ERROR %:	4.02				
LAYER #:	1	2	3	4	5
"Ro" (Ohm m):	389.	111.6	175.7	1407	376.6
DEPTH(m):	1.14	15.05	38.03	90.97	-END-
THICKNESS (m):	1.14	13.91	23.25	54.66	

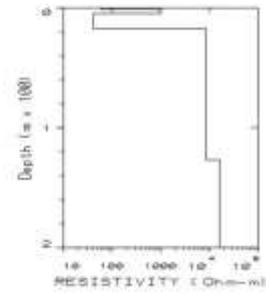
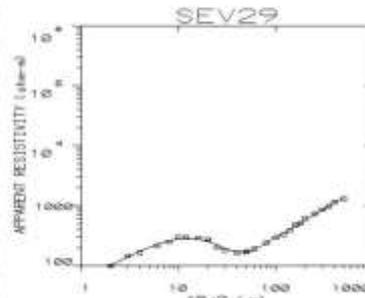
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	1567
2	3	1	1600
3	4	1	1800
4	6	1	2000
5	8	1	2100
6	10	1	2050
7	12	1	2000
8	16	5	1987
9	20	5	1650
10	25	5	1450
11	30	5	1000
12	40	5	800
13	50	20	500
14	60	20	304
15	70	20	260
16	80	20	240
17	100	20	234
18	120	20	223
19	140	50	209
20	160	50	198
21	180	50	195
22	200	50	190
23	250	50	188
24	300	50	180
25	350	50	170
26	400	50	160
27	500	50	150



**KQ**

ERROR %:	5.11			
LAYER #:	1	2	3	4
"Ro" (Ohm m):	1455	2518	202.2	113.4
DEPTH(m):	1.83	13.06	197.13	-END-
THICKNESS (m):	1.83	11.20	185.9	

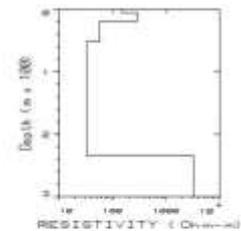
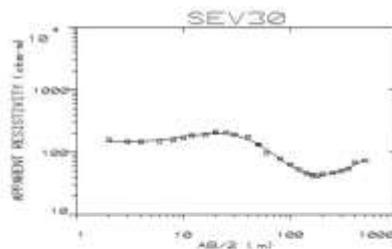
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	100
2	3	1	144
3	4	1	165
4	6	1	214
5	8	1	249
6	10	1	300
7	12	1	297
8	16	5	290
9	20	5	273
10	25	5	201
11	30	5	180
12	40	5	164
13	50	20	170
14	60	20	190
15	80	20	240
16	100	20	297
17	120	20	330
18	140	20	387
19	160	50	480
20	180	50	505
21	200	50	618
22	250	50	738
23	300	50	865
24	350	50	971
25	400	50	1150
26	500	50	1306



**KIA**

ERROR %:	4.83				
LAYER #:	1	2	3	4	5
"R <sub>0</sub> " (Ohm m):	59	1002	41.09	1265	1622
DEPTH (m):	1.07	4.62	17.34	109.3	-END-
THICKNESS (m):	1.07	3.54	12.72	93.47	

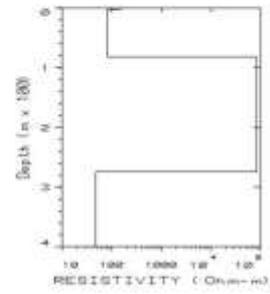
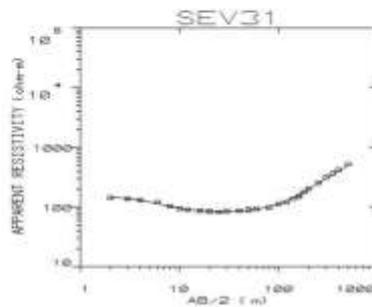
ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	159
2	3	1	149
3	4	1	147
4	6	1	150
5	8	1	156
6	10	1	170
7	12	1	186
8	16	5	190
9	20	5	210
10	25	5	207
11	30	5	193
12	40	5	176
13	50	20	132
14	60	20	96
15	80	20	78
16	100	20	64
17	120	20	53
18	140	20	46
19	160	50	43
20	180	50	42
21	200	50	45
22	250	50	47
23	300	50	50
24	350	50	54
25	400	50	68
26	500	50	73



**KQH**

ERROR %:	5.19				
LAYER #:	1	2	3	4	5
"R <sub>0</sub> " (Ohm m):	145.41	290.5	56.33	32.07	3242
DEPTH (m):	5.06	18.72	51.87	24.2	-END-
THICKNESS (m):	5.06	13.65	33.15	182.3	

ESTACIÓN	AB/2	MN	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
1	2	1	142
2	3	1	138
3	4	1	130
4	6	1	120
5	8	1	102
6	10	1	93
7	12	1	89
8	16	5	86
9	20	5	84
10	25	5	82
11	30	5	85
12	40	5	87
13	50	20	90
14	60	20	93
15	80	20	98
16	100	20	112
17	120	20	120
18	140	20	138
19	160	50	150
20	180	50	178
21	200	50	201
22	250	50	254
23	300	50	320
24	350	50	366
25	400	50	421
26	500	50	523



**HK**

ERROR %:	3.98			
LAYER #:	1	2	3	4
" $\rho_{ho}$ " (Ohm m):	149.9	82.10	8354	48
DEPTH (m):	2.54	82.15	275	-END-
THICKNESS (m):	2.54	79.56		