



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO GEOELECTRICO DE LA ZONA  
DE EL LLANO EN EL ESTADO  
DE AGUASCALIENTES

T E S I S

Que para obtener el Título de  
INGENIERO GEOFISICO  
P R E S E N T A N:

Jorge Alfonso Martínez de Anda  
Héctor Pérez Herrera

MEXICO, D.F.

1990

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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

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

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

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

## INDICE

### CAPITULO I.- GENERALIDADES

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| I.1.- INTRODUCCION .....           | I.1 |
| I.2.- LOCALIZACION .....           | I.2 |
| I.3.- VIAS DE COMUNICACION .....   | I.2 |
| I.4.- CLIMA .....                  | I.3 |
| I.5.- VEGETACION .....             | I.4 |
| I.6.- OROGRAFIA .....              | I.5 |
| I.7.- HIDROLOGIA .....             | I.6 |
| I.8.- ACTIVIDADES ECONOMICAS ..... | I.7 |

### CAPITULO II.- GEOLOGIA

|  |       |
|--|-------|
| II.1.- FISIOGRAFIA .....                       | II.1  |
| II.2.- GEOLOGIA REGIONAL Y ESTRATIGRAFIA ..... | II.1  |
| II.2.1- ROCAS IGNEAS .....                     | II.3  |
| II.2.2- ROCAS SEDIMENTARIAS .....              | II.4  |
| II.2.3- ROCAS METAMORFICAS .....               | II.8  |
| II.3.- GEOLOGIA DEL AREA .....                 | II.10 |
| II.4.- GEOLOGIA ESTRUCTURAL .....              | II.11 |
| II.5.- GEOLOGIA HISTORICA .....                | II.11 |

### CAPITULO III.- ESTUDIO GEOFISICO Y ASPECTOS TEORICOS

|   |        |
|---|--------|
| III.1.- INTRODUCCION .....  | III.1  |
| III.1.1.-PROPIEDADES ELECTRICAS DE LAS ROCAS .....  | III.1  |
| III.2.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA PROSPECCION<br>ELECTRICA POR CORRIENTE CONTINUA ..... | III.6  |
| III.2.1.-DISPOSITIVOS ELECTRICOS .....  | III.9  |
| III.3.- TEORIA DEL SONDEO ELECTRICO VERTICAL .....  | III.12 |
| III.3.1.-INTRODUCCION .....   | III.12 |
| III.3.2.-SOLUCION DEL PROBLEMA DIRECTO PARA MEDIOS<br>ESTRATIFICADOS .....                  | III.14 |

|  |        |
|--|--------|
| III.3.3. - ADAPTACION DE LA SOLUCION A LAS CONDICIONES<br>DE FRONTERA .....                      | III.16 |
| III.3.4. -FUNCION CARACTERISTICA O KERNEL .....  | III.20 |
| III.3.5. -RESISTIVIDAD APARENTE .....  | III.21 |
| III.4. - CALCULO NUMERICO DE CURVAS TEORICAS PARA<br>MEDIOS HORIZONTALMENTE ESTRATIFICADOS ..... | III.23 |
| III.4.1. -METODO DE FILTRADO LINEAL .....  | III.24 |
| III.4.2. -INTERPRETACION CUALITATIVA .....   | III.25 |
| III.4.3. -INTERPRETACION CUANTITATIVA .....  | III.26 |
| III.4.3.1. -METODOS GRAFICOS .....   | III.27 |
| III.4.3.2. -METODOS DE INTERPRETACION ITERATIVA<br>AUTOMATICA .....                              | III.28 |
| III.5. - TRABAJOS DE CAMPO .....   | III.35 |
| III.6. - RESULTADOS OBTENIDOS .....  | III.38 |

|   |      |
|---|------|
| CAPITULO IV. - INTEGRACION DE LA INFORMACION GEOLOGICA<br>Y GEOFISICA ..... | IV.1 |
|---|------|

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

# CAPITULO I

## GENERALIDADES.

### I.1.- INTRODUCCION.

El estado de Aguascalientes es de los estados de mayor incremento poblacional, ya que tiene una tasa de crecimiento del 3.2 %. Este gran crecimiento poblacional ha requerido una creciente demanda de recursos naturales, de estos recursos uno de los más importantes es el agua, tan esencial para la agricultura, ganadería e industria, como para la vida doméstica.

El problema de la dotación de agua es particularmente grave en la zona de los Llanos, al oriente de la ciudad de Aguascalientes, debido a que presenta promedios muy bajos de precipitación y no cuenta con ríos ni arroyos de importancia; incluso son escasos los años en que los bordes de almacenamiento de agua para riego y abrevadero se llenan a su capacidad máxima. Consecuentemente la S.A.R.H. consideró con primordial importancia realizar estudios geológicos y geofísicos en esta área, para poder incrementar la agricultura a base de riego y fomentar la ganadería, así como la dotación de agua potable a las comunidades rurales.

Esto trae como consecuencia la exigencia de técnicas exploratorias más refinadas, permitiendo conocer con mayor detalle las condiciones geológicas que presenta el subsuelo, y así tener una solución efectiva y económica de los problemas relacionados con la exploración y utilización de un recurso natural como es el agua.

## I.2.-LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO .

El área de estudio está situada en la parte sureste del estado de Aguascalientes, en la región denominada como la zona de Los Llanos (figura # 1). Esta región se encuentra limitada por los paralelos de latitud norte  $22^{\circ} 00'$  y  $21^{\circ} 44'$  y entre los meridianos  $101^{\circ} 55'$  y  $102^{\circ} 10'$  de latitud oeste, la cual abarca una superficie de  $300 \text{ Km}^2$ . La zona de los Llanos es una extensa planicie con pequeñas ondulaciones que abarca un área aproximada de  $1500 \text{ Km}^2$ .

## I.3.- V I A S D E C O M U N I C A C I O N .

El área de estudio cuenta con excelentes vías de comunicación, como se puede ver en la figura # 2. El área se encuentra comunicada por dos carreteras federales, la No. 70 y la No. 66. La carretera federal No. 70 une las ciudades de Aguascalientes y San Luis Potosí. La carretera federal No. 66 une a Aguascalientes con Loreto, Zac.

A la altura del kilómetro 24 de la carretera No. 70 existe un entronque con la carretera estatal que comunica a las poblaciones de Palo Alto y La Luz, esta carretera estatal cruza de sur a norte la zona de estudio y entronca con la carretera federal No 66.

De estas carreteras parten varios caminos vecinales que permiten recorrer toda el área de estudio, los principales son : La terracería que comunica a la ciudad de Aguascalientes con el poblado La Luz, enlazando a poblaciones como San Antonio de los Pedroza, Montoya y Francisco Sarabia, la terrace-

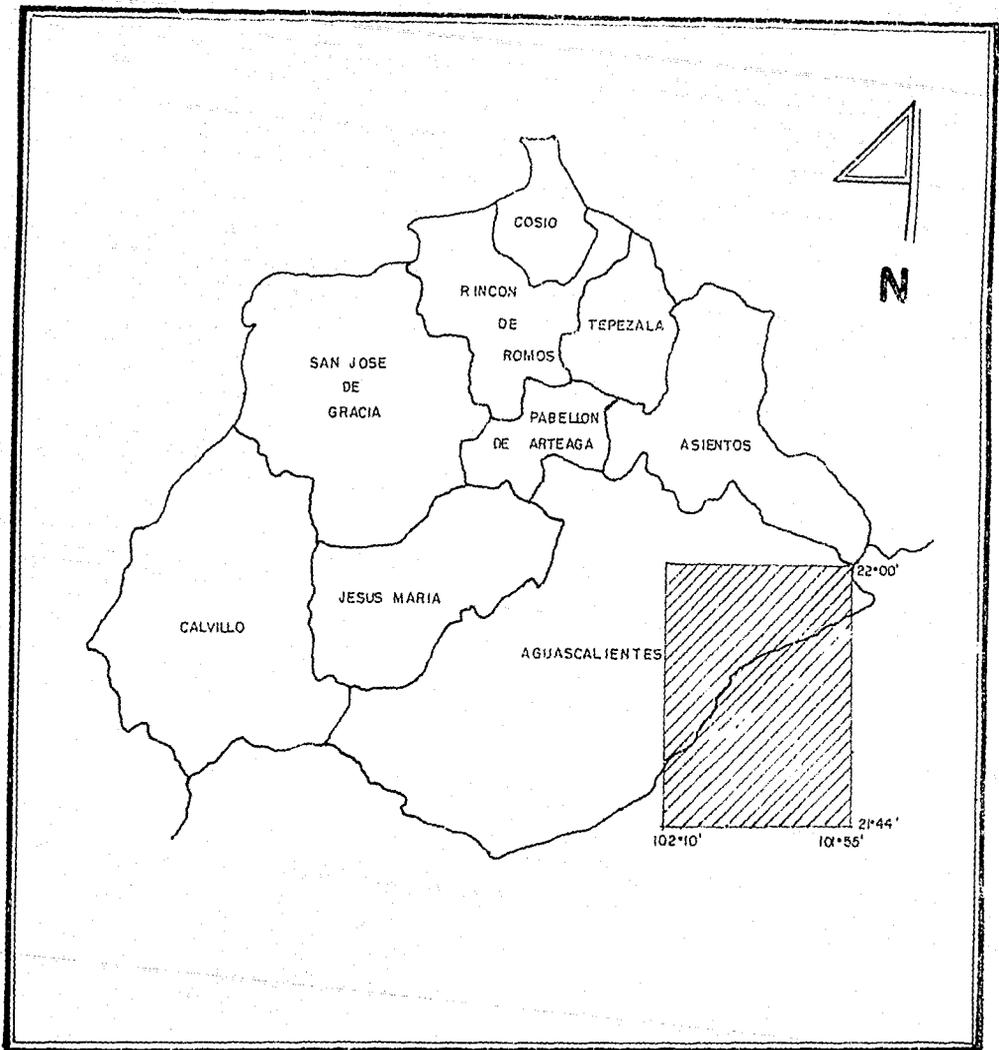


FIGURA No 1



ZONA DE ESTUDIO

|   |                              |
|---|------------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO |                              |
| FACULTAD DE INGENIERIA                  |                              |
|   | DIVISION MUNICIPAL           |
|   | DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES |

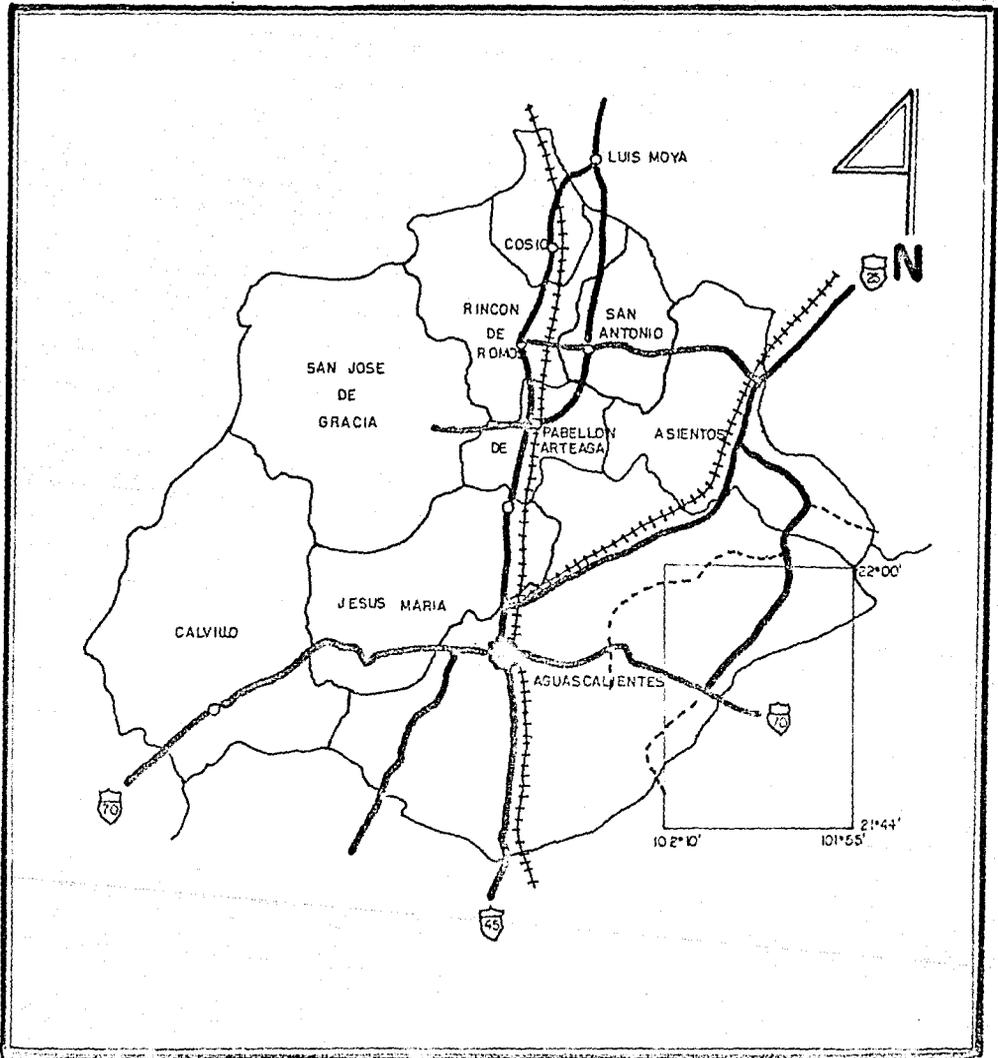


FIGURA No2

**SIMBOLOGIA**

-  CARRETERA
-  VIA DEL TREN
-  DESTINO

|   |  |
|---|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO   |  |
| FACULTAD DE INGENIERIA  |  |
|  | <p><b>PRINCIPALES RUTAS<br/>DE COMUNICACION EN<br/>EL EDO. DE AGS.</b></p> |
|   |  |

ría que comunica al poblado de Calvillito con el de Jesús Terán ( El Muerto ), pasando por San Francisco de los Viveros y el Milagro. Además existen numerosas veredas y brechas que comunican a los diferentes poblados del área, (figura # 2).

#### I.4.- C L I M A .

Para obtener el clima de la zona de los Llanos, se tomaron en cuenta los planos de isoyetas e isotermas realizados por la S.A.R.H., así como la información de cuatro estaciones climatológicas localizadas en el área, las cuales indican que el clima predominante en la zona es el semidesértico con una temperatura promedio de 18°C, con frío en invierno y lluvias escasas en verano.

Las estaciones climatológicas observadas, presentaron un tipo de clima como se muestra a continuación :

| E S T A C I O N         | C L I M A |
|-------------------------|-----------|
| Arellanos .....         | BSbkw     |
| San Bartolo .....       | BSakw     |
| El Tule .....           | BSbkw     |
| Viudas de Oriente ..... | BSakw     |

los cuales, de acuerdo al sistema de clasificación de climas propuesto por Koppen (1936) tienen las siguientes características:

BS = Climas esteparios o semidesérticos

a = Temperatura del mes más caliente mayor de 22° C.

b = Temperatura del mes más caliente menor de 22° C., y durante cuatro meses al menos, con temperaturas

superiores a 10 °C.

w = Caliente con temperatura media anual inferior a 20° C.

k = Frio en invierno con temperatura media anual inferior a 18°C, del mes más caliente mayor de 18°C.

#### I.5.- V E G E T A C I O N .

La vegetación predominante es la correspondiente a climas semidesérticos, entre los cuales predominan las especies pertenecientes a las cactáceas y los matorrales, cuyos representantes más comunes en la zona se mencionan a continuación.

| NOMBRE COMUN           | NOMBRE CIENTIFICO       |
|------------------------|-------------------------|
| Huizache .....         | <i>Acacia sp.</i>       |
| Nopal .....            | <i>Opuntia sp.</i>      |
| Nopal Cardón .....     | <i>O. sneptacantha.</i> |
| Mezquite .....         | <i>Prosopis sp.</i>     |
| Nopal Tapón .....      | <i>Opuntia robusta.</i> |
| Nopal Duraznillo ..... | <i>O. leucarincha.</i>  |
| Cardoche .....         | <i>O. inbricata.</i>    |
| Vara Dulce .....       | <i>Eisenhardtia.</i>    |

' En las partes bajas y planicies se encuentran pastizales de los generos: Aristida, Beutelova, Mublienbergia, Sangregado y Cola de Caballo.

Se desarrolla esta clase de vegetación en climas semidesérticos, debido a la escasa humedad en el suelo, consecuencia de altas temperaturas y la baja precipitación pluvial, lo que hace que la transpiración de las plantas sea alta. Esta situación ha determinado que los vegetales

adaptados a este tipo de ambiente tengan características y órganos de defensa contra este fenómeno, como son las espinas, las hojas de tamaño reducido y la baja altura de las plantas, lo que hace que el suelo reciba un mínimo de residuos vegetales y sea muy pobre en materia orgánica y nitrógeno.

#### I.6.- O R O G R A F I A .

El territorio del estado de Aguascalientes es principalmente montañoso y se distinguen dos grandes sierras que lo cruzan por su lado este y oeste.

La que lo cruza por el este, conocida como la Sierra de Asientos, es la de menor altura y extensión; su pico más alto es el cerro de Altamira, con 2677 m.s.n.m..

La del oeste, recibe sucesivamente los nombres de Sierra Fría, del Pinal, de Pabellon, de Guajolotes y del Laurel; sus elevaciones más importantes son los cerros de La Ardilla, con 3003 mts., y El Jaguey con 2704 metros sobre el nivel del mar (figura # 3).

Ambas cordilleras se desprenden de las sierras de Zacatecas y cruzan Aguascalientes formando al centro un amplio valle. La estructura geológica de la sierra oeste comprende corrientes de riolitas y bancos horizontales de tobas, en las que la erosión ha formado una serie de mesetas escalonadas, un ejemplo de estas formaciones son las mesetas y grandes picos acantilados de la sierra de Guajolotes. La sierra de Asientos tiene una composición caracterizada por la presencia de calizas, lutitas y rocas metamórficas atravesadas por intrusiones dioríticas.

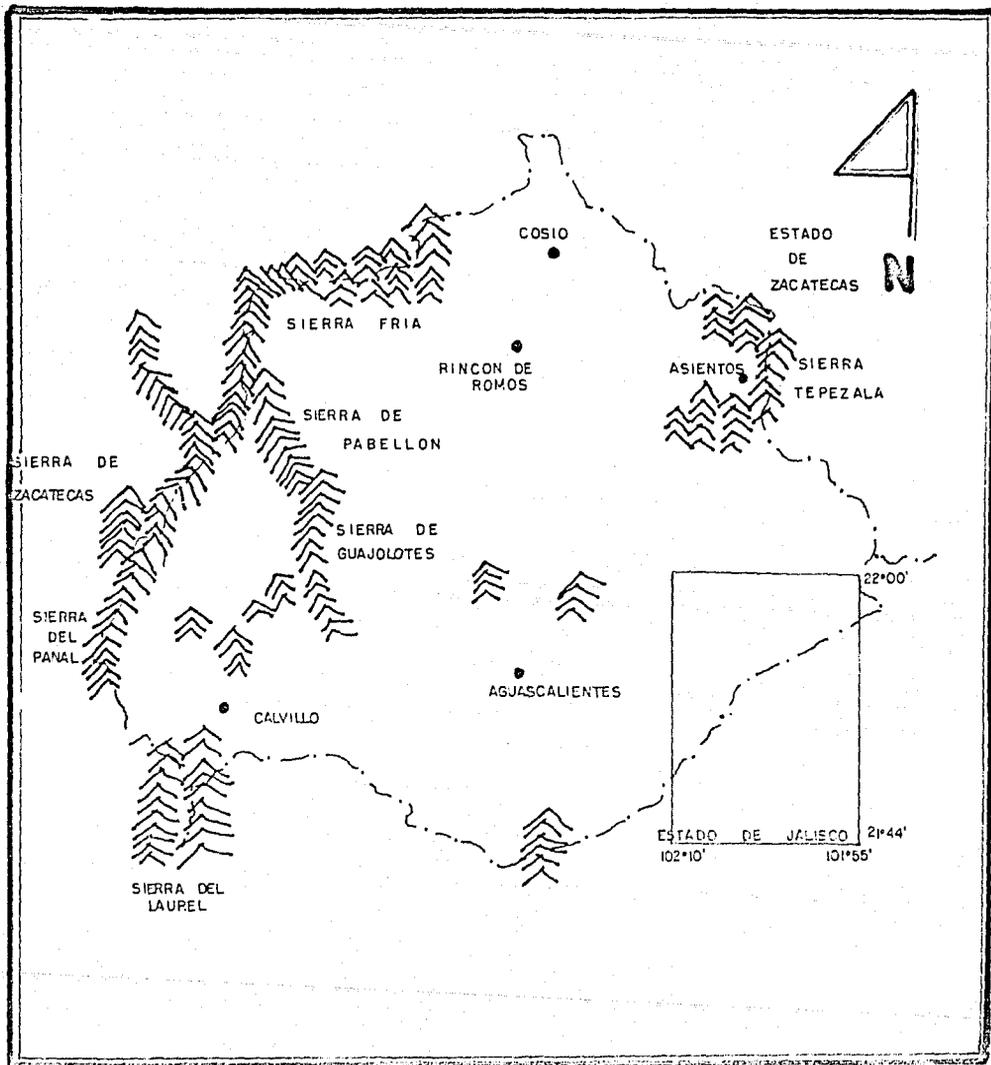


FIGURA No3

SIMBOLOGIA



SIERRA



MUNICIPIO

|   |                         |
|---|-------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO |                         |
| FACULTAD DE INGENIERIA                  |                         |
|   | <p><b>OROGRAFIA</b></p> |

## I.7.- H I D O G R A F I A .

La red hidrográfica del estado de Aguascalientes tiene como ejes principales a los ríos Aguascalientes y Calvillo los cuales a su vez pertenecen a la subcuenca del Río Verde (el primero), y a la del Río Juchipila (el segundo), formando parte estos del Río Santiago en la vertiente del Océano Pacífico.

La zona de los Llanos se encuentra drenada en su parte noreste por pequeños arroyos que aportan su caudal al Río Chicalote, y en su parte suroeste por los arroyos; el Cedazo, Los cabos, Paso Hondo, San Francisco y Calvillito principalmente, así como otros de menor importancia.

Los arroyos de la zona tienen escurrimientos poco abundantes y no son perennes, debido a la poca precipitación y a que existe un número elevado de vasos de almacenamiento construídos sobre los cauces de los arroyos para utilizar sus caudales con fines agrícolas, pecuarios y domésticos (figura # 4).

## I.8.- A C T I V I D A D E S E C O N O M I C A S .

La población económicamente activa del estado de Aguascalientes representó, en 1985, el 30.8 % del total de los habitantes.

La población económicamente activa por sectores en la entidad, para 1985 se presentó de la siguiente forma; 15 por ciento en el sector primario, 41.5 en el industrial y el 34.5 en el de servicios (un 9 por ciento correspondió a no especificado).

Así en el estado, la población rural representó en 1980, el 29.3 por ciento del total de los habitantes, proporción que

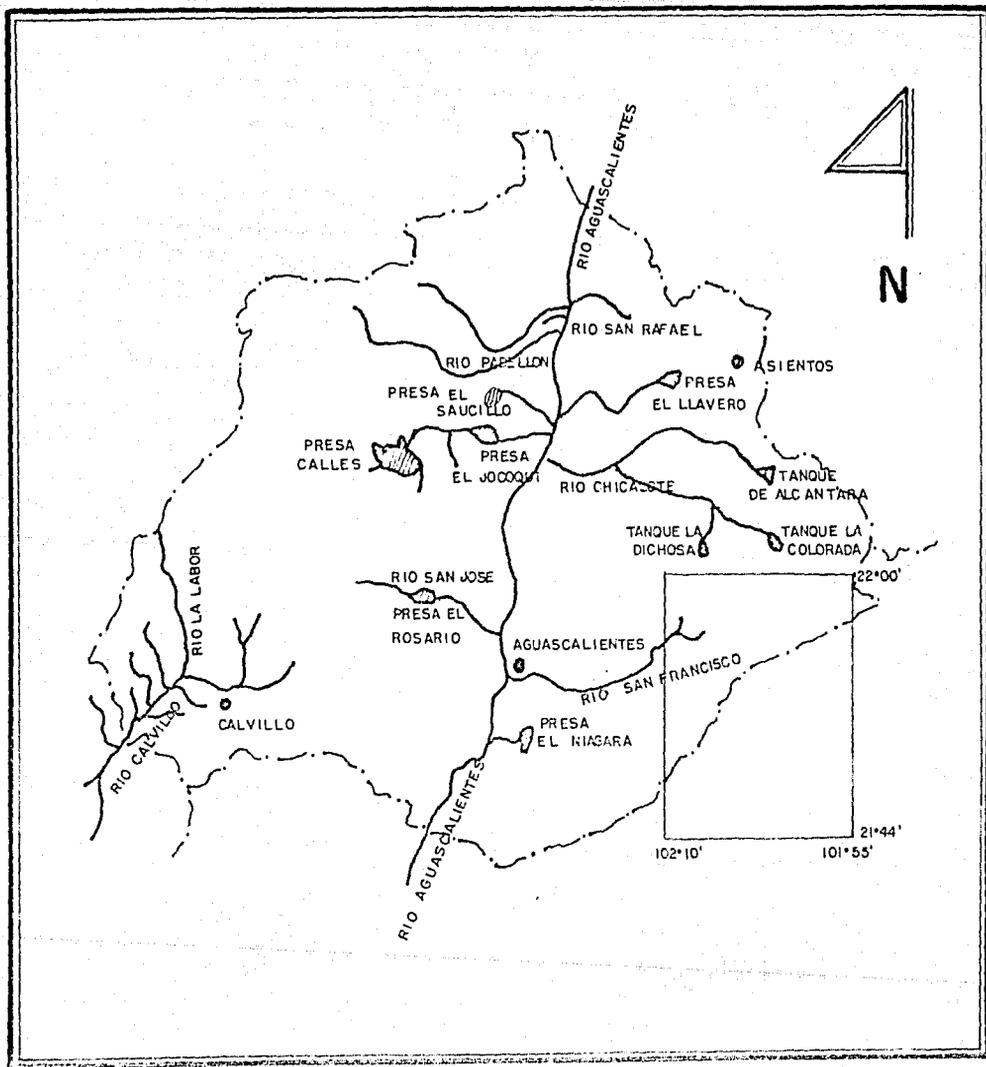


FIGURA No 4

SIMBOLOGIA

-  PRESA
-  RIO
-  MUNICIPIO

|   |                        |
|---|------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO   |                        |
|  | FACULTAD DE INGENIERIA |
|   | <b>HIDROGRAFIA</b>     |

para 1985, fué de 21.4 por ciento; esta disminución se debió principalmente, a la mecanización de la agricultura de riego y a la baja productividad en la agricultura de temporal.

A diferencia del sector anterior, el industrial ha aumentado su crecimiento, lo que le ha permitido ocupar cada vez mayor cantidad de población económicamente activa; mientras que en 1980, fué del 21.7 por ciento, en 1985 se observa un incremento notable, alcanzando el porcentaje de 41.5.

En el sector servicios también aumento la participación de la población del 29.4 por ciento en 1980, al 34.5 en 1985.

El valor del Producto Interno Bruto estatal en 1980, fué de 26 mil 125.5 millones de pesos, lo que significó 50 mil 153 pesos por habitante, ubicándose entre las primeras 16 entidades federativas, por el monto del PIB por persona.

Paralelamente al proceso de urbanización e industrialización, la agricultura es una actividad importante. La agricultura disponía del territorio agascalentense como superficie laborable. En 1983, existían 159 mil 889 hectáreas sembradas, de las cuales la cuarta parte era de riego y el resto de temporal.

En la zona irrigada destacan los cultivos de vid, guayaba y durazno, así como las legumbres, todos estos con un alto nivel de rentabilidad.

Es importante resaltar que el estado en 1985, continuó como uno de los principales centros de engorda y comercialización de bovinos, con 47 682 productores de leche y 60 236 de carne, en tanto que el volumen de leche alcanzó 40 mil litros diarios, lo que permitió satisfacer el consumo, local y además, enviar excedentes a otros mercados nacionales.

La explotación de minas y de canteras en el estado de Aguascalientes ocupa una posición modesta dentro de la economía

estatal; por concepto de explotación y beneficio de yacimientos minerales se generaron 263 millones de pesos equivalentes al 1 % de PIB estatal.

No obstante, existen buenas expectativas a mediano plazo para este tipo de industria; el cobre, plata, fierro y plomo, son recursos minerales susceptibles de ser explotados.

Los centros mineros más importantes del estado se ubican, fundamentalmente, en los municipios de Tepezalá y Asientos que son vecinos y tienen características geológicas muy semejantes; la compañía Real de Asientos S.A., y la de Minas de San Pedro y Anexas, S.A., son los que benefician los minerales extraídos.

Las manufacturas ocupan un lugar destacado entre las actividades económicas de la entidad. Entre las manufacturas destaca la producción de bebidas alcohólicas, contribuyendo con el 33.1 % del PIB de las mismas en el país.

Hay otro tipo de manufacturas en el estado, como son las industrias de hilados y tejidos de fibras blandas, de prendas de vestir y otras industrias textiles, que en conjunto, contribuyeron con el 20.6 % del PIB manufacturero estatal.

Las industrias de muebles metálicos y las de equipo y material de transporte, además de encontrarse entre las diez ramas manufactureras más importantes de la entidad, a nivel nacional ocupando el sexto y octavo lugares, entre las industrias respectivas del país.

La ciudad de Aguascalientes cuenta, dentro de la rama de servicios, con eficiente transporte urbano que comunica a todas sus colonias con la zona comercial y de establecimientos públicos, a través de diversas rutas.

El sistema de correos está integrado por una administración central en la ciudad de Aguascalientes, seis sucursales urbanas, ocho foraneas y dieciocho agencias; el servicio

telegráfico estatal se proporciona por medio de diez oficinas, seis de ellas ubicadas en el municipio de Aguascalientes.

Por lo que se refiere a la red de servicios telefónicos, la entidad contaba en 1985, con el servicio de 24 866 líneas, que permitían la instalación de 52 336 aparatos en diez localidades; de ese total, el 96 % se concentraban en la ciudad capital. Existían también 277 teléfonos públicos instalados en la ciudad de Aguascalientes.

Hay 9 radiodifusoras, de las cuales siete son comerciales y dos culturales; existen, igualmente, dos canales locales de televisión y cuatro repetidoras de los canales de la ciudad de México. En la capital del estado circulan diariamente al rededor de 100 mil ejemplares de tres periódicos locales, además de los diarios de circulación nacional, procedentes de la capital del país.

## CAPITULO II.

### GEOLOGIA

#### II.1.- FISIOGRAFIA .

El estado de Aguascalientes se encuentra casi en su totalidad dentro de la región fisiográfica definida por Raisz (1960) como el Altiplano Mexicano; dentro de esta zona se distinguen tres unidades; las planicies y terrazas, los domos y los plegamientos.

Las planicies se localizan en la parte norte del estado de Aguascalientes, comprendiendo el Valle del mismo nombre. Existen otras planicies de menor extensión en la porción oriental del estado; abarcando los Valles de Chicalote y Tierra Blanca, así como los Llanos. Los Llanos tienen una altitud media de 2000 metros, están drenados por numerosos arroyos y se aprecian lomeríos de forma redondeada.

Las mesetas cubren casi el 50 % del estado, formadas principalmente por rocas volcánicas extrusivas (riolitas y tobas); y su drenaje desarrollado es dendrítico rectangular.

Los domos y plegamientos se desarrollan principalmente en la porción norcentral del estado y comprenden las montañas localizadas al norte del Bajío de la Tesorería, con altitudes que oscilan entre los 2200 y 2400 m.s.n.m., el tipo de drenaje desarrollado en estas sierras es de emparrillado.

#### II.2.- GEOLOGIA REGIONAL Y ESTATIGRAFICA.

En el estado de Aguascalientes afloran los tres tipos de rocas que se conocen, las cuales son; rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Las rocas ígneas se localizan cubriendo casi toda la parte occidental del estado, formando lo que se conoce como la Sierra Fría.

Las rocas sedimentarias están representadas por calizas, lutitas y areniscas de edad cretácica (aproximadamente de 120 a 160 millones de años), las cuales forman parte de la Sierra de Tepezalá, mismas que al ser intrusionadas por rocas graníticas dieron lugar a la formación de zonas mineralizadas. Existe además, un grupo de rocas más jóvenes constituidas por los aluviones o los materiales de relleno que conforman los valles de Aguascalientes, Chicalote, Tierra Blanca, Venaderos, Calvillo y la zona de Los Llanos, representados por una alternancia de materiales granulares entre los que predominan las arenas, gravas y boleas principalmente de origen fluvial, sin descartarse la aportación de origen eólico y también de origen volcánico; esto último debido a la actuación de la revolución Laramídica, durante la cual se cree tuvo lugar la formación de las rocas ígneas extrusivas mencionadas anteriormente.

Otras rocas que afloran dentro del estado son las metamórficas, estas se encuentran aflorando sólo en tres lugares, uno de ellos está localizado a 20 km. al noroeste de la ciudad de Aguascalientes; representado por esquistos, metacuarcitas y pizarras que forman al cerro del Ratón.

A continuación se describen los afloramientos encontrados en el estado de Aguascalientes, atendiendo a su litología y edad.

## II.2.1.- ROCAS IGNEAS.

### - GRANITO Gr (T).

Está distribuido principalmente en la porción norte del estado. Consistiendo de un granito de color gris y de composición ácida, de grano grueso es sumamente compacta y tenaz, presenta escaso fracturamiento, se encuentra intrusionando a rocas metamórficas triásicas y sedimentarias cretácicas y es cubierto discordantemente por derrames de riolitas postcretácica.

Su edad corresponde al terciario inferior y se localiza en áreas pequeñas al este del poblado de Santo Tomas.

### - RIOLITAS - TOBA ACIDA R-Ta(T).

Riolitas que alternan con tobas riolíticas y tobas ácidas.

Las riolitas se presentan en forma masiva, de estructura fluidal y esferulíticas, compacta y tenaz, de textura afanítica, con cristales pequeños de cuarzo y feldespato de color rojo. El color de las riolitas varía del rojizo al café, café morado y café rosado.

Las tobas riolíticas son de grano fino, compactas, de color rosa y en ocasiones se presentan muy soldadas (ignimbritas).

Los pseudoestratos se encuentran dispuestos de manera senciblemente horizontal. Cubren discordantemente a rocas del Triásico, Jurásico y Cretácico.

Sus afloramientos son extensos ya que se encuentran distribuidos por todo el estado, y constituyen las Sierras Fría y del Laurel como las formas fisiográficas más

importantes.

#### **BASALTOS B(CT).**

Unidad de rocas extrusivas básicas, de color gris oscuro, que presentan textura afanítica, estructura vesicular y lajeada, dispuestas en coladas de poco espesor; sobreyace en forma discordante a riolitas, tobas riolíticas, esquistos y areniscas-conglomerados. Se encuentran aflorando al este del estado en el cerro Juan el Grande y al oeste del pueblo Puerto de Fragua.

### **II.2.2. - R O C A S S E D I M E N T A R I A S .**

#### **- CALIZA-LUTITA C<sub>2</sub>-Lu(Ki).**

Interestratificación de caliza y lutita de origen marino. La caliza es de color gris claro y se presenta en estratos que varían de delgados a medianos, con vetillas de calcita.

La lutita va del color gris claro al verdoso, en capas delgadas que forman paquetes hasta de 30 centímetros de espesor.

Esta unidad subyace a la caliza de la formación Cupido del Cretácico Inferior, sobreyace a la formación la Caja. Pertenecen al Cretácico Inferior y se localiza al noreste de la población La Ballena.

#### **-CALIZA C<sub>2</sub>(Ki).**

Unidad de caliza depositada en ambiente marino, presenta

grano fino, en estratos cuyo espesor varía de 30 a 130 cm., con intercalaciones de horizontes delgados arcillo-calcareos. Presenta colores de gris claro a oscuro y café claro, con gran cantidad de vetillas de calcita y escasas huellas de disolución. Su contacto superior, en parte, es transicional a caliza-lutita interestratificadas de la Formación Indidura del Cretácico Superior y discordantemente por riolita y toba riolítica, además de ser afectadas por pequeñas intrusiones de granito de edad terciaria. Esta formación se conoce con el nombre de formación Aurora.

Esta unidad se localiza al N y S del poblado de Santo Tomás, y al NE del pueblo de Villa García.

- CALIZA-LUTITA C<sub>2</sub>-Lu(Ks).

Consta de una alternancia de caliza y lutita depositados en ambiente marino. Las calizas cuentan con gran cantidad de material terrígeno, su color va del gris claro al oscuro, están dispuestas en capas delgadas. Las lutitas son laminares, de color amarillo a café. Esta unidad está sumamente plegada, y con fracturamiento intenso.

Esta unidad está en contacto inferior con la caliza de la formación Aurora y su contacto superior con la caliza de la formación Caracol se encuentra afectado por intrusiones ácidas, las que al E del poblado de Tepezalá produjeron la mineralización de cobre y zinc. Por su relación estratigráfica, esta unidad pertenece a la formación Indidura del Cretácico Superior. Esta formación aflora a los alrededores de los poblados de Tepezalá y La Ballena.

- LUTITA-ARENISCA Lu-Ar(Ks).

Interestratificación de lutita y arenisca de origen marino. Las lutitas son laminares, fisiles y están mezcladas con material orgánico, de color gris claro a negro, en estratos delgados. Las arenas se presentan en estratos delgados y su color va de amarillo a café.

Esta unidad se encuentra muy plegada y fracturada, sobreyace en forma concordante a la caliza-lutita de la formación Indidura, su contacto superior es discordante y la cubren riolitas, gravas y arenas, en algunas áreas se encuentra afectada por intrusiones de granito de edad terciaria. Debido a su posición estratigráfica, se relaciona con la formación Caracol del Cretácico Superior y se encuentra distribuida al W del poblado Los Milagros y en los alrededores de los poblados: Estancia de las Animas, El Tepozan y el cerro El Frontón.

- LUTITA-ARENISCA Lu-Ar(T).

Interestratificación de lutita y arenisca, sedimentadas en ambiente continental. Las areniscas son de color amarillo claro, de grano grueso, cementante calcáreo y con muchos poros vacíos, su estratificación es horizontal y sus estratos van de delgados a medios, sus fragmentos son de riolita, cuarzo, calcedonia y lutita silicificada. Las lutitas son de color amarillo claro, laminares y forman estratos que varían de 70 a más de 100 cm. de espesor. Subyace concordantemente a la arenisca-conglomerado del Terciario Superior. Se localiza al

sur del estado en los alrededores de Belén del Refugio.

- ARENISCA-CONGLOMERADO Ar-Cg(T).

Es un cuerpo que gradualmente cambia de arenisca a conglomerado, se depositó relleno las partes bajas continentales.

Esta unidad presenta una matriz limosa en pequeñas cantidades y escaso cementante; los fragmentos provienen principalmente de rocas volcánicas ácidas y su forma va de angulosa a subredondeada. Estos sedimentos sobreyacen concordantemente a lutitas y areniscas continentales, y discordantemente a riolitas, tobas ácidas, caliza, lutita y areniscas, estas últimas de origen marino. Su edad pertenece al Terciario superior. Los afloramientos se encuentran ubicados en los valles de Jalpa, Calvillo y en los flancos del valle de Aguascalientes de manera predominante.

- CONGLOMERADO Cg (Q).

Sus fragmentos provienen de riolitas y tobas ácidas en su mayoría, su forma varía de angulosa a subredondeada, presenta matriz limo-arenosa, tiene poca compactación en su parte inferior, pero en su parte superior presenta costras de caliche que le dan una buena cementación. Sobreyace en forma discordante principalmente a riolitas y tobas ácidas, y le corresponde una edad del cuaternario. Sus afloramientos se ubican en los alrededores de las poblaciones de : Villanueva, Zoepqui y al este de El Tepetate .

### II.2.3. - ROCAS METAMORFICAS .

#### - ESQUISTO E(Tr)

Son las rocas más antiguas del área y sus colores varían del verde al gris, fueron originadas a partir de arenas de grano grueso a fino, limolitas, lutitas, las que sufrieron un metamorfismo regional, presentan planos de exfoliación bien desarrollados, y además se encuentran muy fracturadas. Están cubiertas discordantemente por rocas volcánicas ácidas e intrucionadas por rocas graníticas. Debido a la similitud se correlacionan con las rocas del Triásico Superior. Sus afloramientos se encuentran al oeste de la ciudad de Aguascalientes y al noroeste de Jesús María.

#### - CUARCITA C(Tr).

Esta unidad presenta una coloración verde y fue originada por el metamorfismo regional de ortocuarcitas, físicamente es densa, muy tenaz y se encuentra bastante fracturada. Se encuentra subyaciendo en discordancia angular a caliza y lutita interestratificada del Cretácico Superior; es correlacionable con la formación Zacatecas de edad Triásico Superior. Esta unidad aflora al este del poblado Noria de los Angeles.

#### - ESQUISTO E(CJ).

Unidad litológica con colores que varían del verde claro al

gris oscuro originada a partir de caliza, lutita y arenisca interestratificadas, las cuales sufrieron un metamorfismo regional.

Esta presenta una textura sacaroides debido a la parcial recristalización del carbonato de calcio, además los planos de exfoliación están bien desarrollados en las lutitas y areniscas.

En los alrededores del poblado de San José de Guadalupe esta subyaciendo discordantemente a riolitas y tobas ácidas. Al sur del poblado de Tepezalá, esta unidad sobreyace a rocas del Cretácico Superior debido a una falla inversa. Está cubierta en áreas pequeñas, por derrames riolíticos y afectados por intrusiones ácidas que dieron origen a la mineralización de cobre, zinc y fosforita. En esta unidad están englobadas rocas correlacionables con las formaciones Zuloaga y la Caja, por lo que se le asigna una edad del Jurásico Superior.

#### - S U E L O S .

#### - LACUSTRES La(Q).

Los suelos lacustres son de escasa distribución dentro del estado de Aguascalientes, se encuentran en las partes bajas hacia donde confluyen los arroyos que proporcionan la concentración de sales y sulfatos. Su reciente depósito los ubica dentro del cuaternario, se localizan al este de El Salitre y al sureste de Encinillas.

- ALUVIAL al(Q).

Unidad de suelo aluvial constituido por partículas del tamaño de las arcillas, limos, arenas y gravas de escasa compactación. En la parte superior existe una capa de suelo rico en nutrientes orgánicos, su edad es reciente. Se encuentra distribuida principalmente en los valles de Aguascalientes, Chicalote y la Zona de los Llanos.

II.3.- GEOLOGIA DEL AREA.

El área de estudio presenta una litología compleja debido a que su formación se originó por derrames riolíticos, alternandose con tobas y material sedimentario. A continuación se hace una descripción de la geología superficial de la zona de estudio, lo cual presenta en su parte este y noreste, afloramiento de rocas volcánicas de composición ácida las cuales corresponden con tobas y riolitas. Las tobas se caracterizan por tener un color que varía del blanco al rosáceo, tienen grano fino y son compactas. Las riolitas son compactas, su color varía del rojo violeta al rojo, presentan algo de fracturamiento.

Las partes central y sur, están en su totalidad cubiertas por material de relleno (aluvión), sabiendo por los pozos existentes en la zona, que el espesor aumenta de la parte norte hacia la parte sur, lo cual hace suponer que el material fué transportado de norte a sur, considerando la dirección de drenaje, casificación y redondez de los granos.

En su parte sur y sureste se encuentra aflorando la unidad

arenisca-conglomerado, está se caracteriza por presentar escasa cementación, y litificación deficiente. Esta unidad pasa gradualmente de arenisca a conglomerado, la forma de sus granos va de anguloso a subredondeado .

#### II.4.- GEOLOGIA ESTRUCTURAL .

Los principales rasgos estructurales observados en el estado de Aguascalientes, son una serie de fallas normales que dieron origen a dos fosas tectónicas ( Gravens ), con orientación NE-SW y corresponden a los valles de Aguascalientes y Calvillo. Estas estructuras se derivan posiblemente de los movimientos tectónicos ligados a la formación del Eje Neovolcánico .

En dirección paralela a la falla principal se encuentran fallas secundarias acompañadas de un intenso fracturamiento.

Las rocas Mesozoicas se encuentran intensamente fracturadas, plegadas y afectadas por fallas inversas ( Cabalgadura ), así como por cuerpos intrusivos ácidos en forma de troncos y diques.

También existen una serie de estructuras volcánicas ácidas ( Conos volcánicos y derrames ), además de un sistema de fracturamiento con orientación NW-SE y NE-SW .

#### II.5- GEOLOGIA HISTORICA .

Durante el Triásico-Jurásico se formaron los depósitos de arenisca y limolitas, derivadas de la erosión de roca preexistentes y depositadas en mares someros, como lo atestiguan las

estructuras laminares que presentan estas rocas. Durante esta época, el basamento tuvo ligeras oscilaciones que originaron las alternancias de estos sedimentos.

En el Jurásico y Cretácico los mares empezaron a transgredir, depositando las arcillas, arenas y lodos calcáreos, los que al final de este período pasan a ser sedimentos calcáreos.

A finales de esta época y principios del Terciario, se origina el emplazamiento de los grandes cuerpos intrusivos ( granitos ), los cuáles influyen en la formación de los levantamientos tectónicos del área, posteriormente a estos levantamientos, viene un período de erosión en las partes altas, el cuál origina clásticos gruesos que se depositan en los flancos de las grandes estructuras, los que al consolidarse formaron los conglomerados. Al finalizar este evento, durante el Eoceno-Oligoceno, vuelve otra vez a surgir un período de intrusiones básicas, las que alteran a las rocas existentes. En la última parte de esta etapa, se empiezan a presentar una serie de fracturamientos por donde escapan erupciones volcánicas que dan origen a las tobas soldadas, depositándose parte de estas en medios acuosos originando las areniscas tobáceas, además de permitir la salida de magmas de tipo ácido que son los que cubren ó rellenan la topografía existente. Al terminar este evento volcánico se inició un basculamiento general en la región que da origen a levantamientos y hundimientos produciendo fallamientos que forman el valle de Aguascalientes. Los levantamientos promueven un proceso erosivo en las partes altas, arrastrando los sedimentos por medios fluviales cuya acumulación sirve de relleno a los valles actuales .

Hasta la fecha se puede observar que continua un proceso de levantamientos ya que los ríos y arroyos principales se

encuentran erosionando la región y han dejado como testigos de ello, las terrazas fluviales en sus márgenes .

## CAPITULO III

### III.1.- TEORIA.

#### III.1.1.- INTRODUCCION.

La Geofísica pura es una ciencia que estudia los fenómenos físicos presentes en la tierra. La Prospección Geofísica es una rama de la Geofísica Pura y consiste en un conjunto de técnicas físicas y matemáticas, aplicadas a la exploración del subsuelo para la búsqueda de sustancias útiles, por medio de observaciones efectuadas en la superficie de la tierra. Los métodos de Prospección Geofísica de mayor importancia, son la Gravimetría, Magnetometría, Sísmica y Eléctrica. Estos últimos son los métodos utilizados para determinar la estructura del subsuelo, a partir del estudio y análisis de las propiedades eléctricas de las rocas que lo forman.

Los métodos de Prospección Eléctrica en su forma general, se pueden clasificar, según la fuente que los produzca. Esto es, en Métodos Eléctricos de Campo Natural ó de campo Artificial. Dentro de los Métodos de Campo Artificial se encuentra el Método de Resistividad, una de cuyas variantes es la técnica del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).

#### III.1.2.- PROPIEDADES ELECTRICAS DE LAS ROCAS.

El comportamiento del campo electromagnético en el subsuelo depende fundamentalmente de las propiedades electromagnéticas

de las rocas. Las propiedades electromagnéticas se representan fundamentalmente por medio de tres magnitudes físicas, que son la resistividad eléctrica ( $\rho$ ), la constante dieléctrica ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad magnética ( $\mu$ ). La propiedad a la que nos enfocamos, debido a la naturaleza del estudio realizado es la resistividad eléctrica.

### III.1.2.1.- RESISTIVIDAD ELECTRICA.

La resistividad se define como la resistencia que la corriente eléctrica encuentra a su paso a través de un material. La resistencia [R] de un conductor alargado y homogéneo de forma cilíndrica está dada por la ecuación:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad S = \text{Sección transversal.}$$

de aquí:

$$\rho = \frac{R S}{L} \quad L = \text{Longitud.}$$

$$\rho = \frac{R S}{L} \quad \rho = \text{Resistividad Eléctrica .}$$

para determinar la unidad de resistividad se sustituye  $S = 1 \text{ m}^2$   
 $L = 1 \text{ m}$ , y  $R = 1 \Omega$  por lo que:

$$\rho = \frac{R S}{L} = R L = [\Omega \cdot \text{m}]$$

La resistividad eléctrica es una propiedad intrínseca que depende de la naturaleza y estado físico del material considerado.

### III.1.2.2. - CONDUCTIVIDAD.

Se le da el nombre de conductividad a la facilidad del paso de la corriente eléctrica por un material. Numericamente es el inverso de la resistividad, y esta dada la expresión por:

$$c = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\text{mho}}{\text{m}} \right]$$

Existen diferentes tipos de conductividad eléctrica las cuales se pueden clasificar de la siguiente manera (Orellana,1972):

|               |             |                          |
|---------------|-------------|--------------------------|
| Conductividad | Electrónica | Metales                  |
|               |             | Semiconductores          |
|               | Iónica      | Dielectricos             |
|               |             | Electrolitos<br>Líquidos |

Esta clasificación se basa en el tipo de portadores de portadores de cargas eléctricas, los cuales pueden ser: electrones ó iones. El grupo de conductividad electrónica se divide en metales y semiconductores.

En los metales la conductividad se debe a que los electrones de valencia de sus átomos puede moverse libremente entre la red cristalina que éstos forman. Son muy escasos los elementos que poseen conductividad metálica en la corteza terrestre, siendo los metales nativos los pocos que tienen este tipo de conductividad, como por ejemplo: el oro, la

plata, el cobre y el estaño.

Los semiconductores son sustancias no metálicas que pueden presentar conductividad al tener, un movimiento libre de sus electrones con la temperatura creciente ó sea que la probabilidad de que sus electrones salten a la banda conductora aumenta con la temperatura, creándose en el material una conductividad intrínseca. Algunos de los minerales que pertenecen al grupo de los semiconductores son los siguientes: la pirita, cromita, siderita, uranita, etc.

En los materiales dieléctricos, los electrones están fuertemente ligados a los átomos, debido a que existen enlaces covalentes, en donde dos átomos comparten dos electrones, ó enlaces iónicos, en los cuales un átomo cede al otro un electrón ó electrones de valencia, quedando ambos con sus capas completas y como iones de signo opuesto. En este caso la red cristalina, forma un electrolito sólido. La mayoría de los minerales pertenecen a este grupo, presentando resistividades muy altas, generalmente superiores a  $10^7 \Omega\text{-m.}$ , como por ejemplo se tiene al azufre, anhidrita, blenda, calcita, feldespatos, fluorita, micas y otros silicatos.

Los electrolitos líquidos se forman debido a la disolución de sales minerales en el agua, así cuando se aplica un campo eléctrico, se produce un movimiento de iones, los iones negativos (aniones) emigran hacia el ánodo (polo positivo), y los positivos (cationes) hacia el cátodo (polo negativo), en donde se descargan.

La resistividad del electrolito varía en forma inversamente proporcional a su concentración de sales y a la temperatura del líquido.

Los electrolitos líquidos son importantes en los métodos eléctricos debido a que las aguas que se encuentran en la

naturaleza se comportan como tales, ya que por lo general tienen disuelta alguna sal.

### III.1.3.- RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS.

Para las formaciones rocosas, la resistividad depende no solo de su constitución mineral, ya que la mayoría de los minerales formadores de rocas son aislantes, sino que depende de diversos factores que hacen que las rocas se comporten en conjunto como conductores iónicos.

Los iones que conducen la corriente, resultan de la disolución de sales en el agua que satura una roca, por lo que la corriente eléctrica fluye por el electrolito que se encuentra en el espacio poroso de la roca.

La resistividad de una roca cuya conductividad se debe únicamente a su contenido de agua, depende de siete parámetros (Orellana,1972):

$$\rho_r = (a b P^{-m} S^{-n}) \rho_a$$

$a$  = coeficiente que depende de la textura.

$b$  = parámetro que depende de la porosidad.

$m$  = parámetro de cementación.

$P$  = porosidad.

$S$  = saturación.

$\rho_a$  = resistividad aparente de la roca.

$\rho_r$  = resistividad de la roca.

$S^{-n}$  = Índice de resistividad

Cuando las rocas contienen elementos arcillosos, la interacción que existe entre su matriz y el agua contenida en sus poros, pueden influir notablemente en la resistividad glo-

bal. El efecto es el de disminuir la resistividad de los electrolitos poco conductores por su escasez ó debil concentración, y aumentar la resistividad de los conductores. De lo anterior puede concluirse que la resistividad de las rocas depende de demasiados factores para que pueda representarse por un solo valor. Sin embargo dentro de la extensión del terreno abarcado por un estudio geoelectrico, el margen de variación es mucho más reducido y en general pueden identificarse las rocas por medio de su resistividad eléctrica.

### III.2.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA PROSPECCION ELECTRICA POR CORRIENTE CONTINUA.

Los campos eléctricos que son de interés en la prospección circulan en medios tridimensionales, por lo que resulta necesario estudiar las leyes físicas a que obedecen estos fenómenos.

Para simplificar el análisis matemático, se considera primeramente el caso de un subsuelo homogéneo e isótropo. Para establecer un campo eléctrico, se utiliza un generador de corriente, conectado a dos electrodos, introducidos en el suelo,

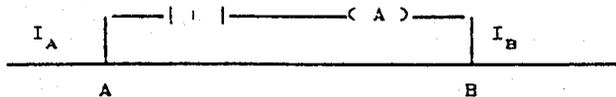


Figura 3.2.1.- Inducción de corriente eléctrica en el subsuelo.

En donde la corriente  $I_A$ , penetra por A en el subsuelo y después de recorrerlo, saldra por B con intensidad  $I_B$  y así mismo se cierra el circuito, por lo que es evidente que:

$$I_A + I_B = 0 \dots\dots\dots ( 3.2.1 )$$

Si el régimen es estacionario.

Las ecuaciones que rigen el fenómeno considerado son las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots\dots\dots ( 3.2.2 )$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \dots\dots\dots ( 3.2.3 )$$

Debido a que el campo estudiado es estacionario, ó sea que no varia con el tiempo, las ecuaciones se reducen a:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \dots\dots\dots ( 3.2.4 )$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \dots\dots\dots ( 3.2.5 )$$

Así la ecuación ( 3.2.4 ) nos dice que el campo eléctrico ( E ) es conservativo. Por lo que se deriva de un potencial escalar ( U ).

$$\vec{E} = - \nabla U \dots\dots\dots ( 3.2.6 )$$

Otras ecuaciones fundamentales para la descripción del fenómeno estudiado son :

La ley de Ohm en su forma diferencial para medios isotrópicos, se representa como :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \dots\dots\dots ( 3.2.7 )$$

Así nos dice que la densidad de corriente  $\vec{J}$  en un punto, tiene la misma dirección y sentido que el campo eléctrico  $\vec{E}$  en el mismo punto, la conductividad eléctrica es el factor de proporcionalidad.

La ley de conservación de la carga ó ecuación de continuidad, esta dada por :

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad \dots\dots\dots ( 3.2.8 )$$

Si combinamos la ecuación ( 3.2.8 ) con la ( 3.2.7 ) tenemos que :

$$\nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot ( \sigma \vec{E} ) = 0 \quad \dots\dots\dots ( 3.2.9 )$$

se tiene entonces que para un estrato homogéneo e isótropo la conductividad es uniforme y por lo tanto :

$$\nabla \sigma = 0 \quad \dots\dots\dots ( 3.2.10 )$$

sustituyendo ( 3.2.10 ) en ( 3.2.9 ) obtenemos que :

$$\nabla^2 U = 0 \quad \dots\dots\dots ( 3.2.11 )$$

que es la ecuación de Laplace, y es válida en todo el semiespacio conductor, pero no en los electrodos, ni en la superficie de discontinuidad de la resistividad eléctrica.

La solución de la ecuación de Laplace para un medio homogéneo e isótropo es :

$$U ( r ) = \frac{\rho I}{2 \pi r} \quad \dots\dots\dots ( 3.2.12 )$$

Partiendo de esta ecuación se puede encontrar la resistividad eléctrica la cual es :

$$\rho = 2 \pi r \frac{U}{I} \quad \dots\dots\dots ( 3.2.13 )$$

Esata ecuación nos define la resistividad eléctrica para un

medio homogéneo e isotrópico.

### III.2.1.- DISPOSITIVOS ELECTRODICOS .

Se le da el nombre de dispositivo electrodicco a un conjunto de electrodos distribuidos de una forma determinada sobre la superficie del terreno, por lo general se emplean dispositivos de cuatro electrodos, alineados simétricamente con respecto a un punto, de los cuales dos son electrodos de emisión A y B por donde circula la corriente eléctrica y dos electrodos de recepción M y N donde se mide la diferencia de potencial.

La diferencia de potencial obtenida al inducir una corriente eléctrica sobre la superficie del terreno está definida por la siguiente ecuación :

$$U_{N}^{M} = \frac{I \rho}{2 \pi} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \dots\dots\dots ( 3.2.14 )$$

$$= \frac{I \rho}{2 \pi} \left[ \left( \frac{1}{A M} - \frac{1}{B M} \right) - \left( \frac{1}{A N} - \frac{1}{B N} \right) \right]$$

despejando la resistividad de la ecuación ( 3.2.14 ) la expresión nos queda como :

$$\rho = \frac{2 \pi}{\left[ \left( \frac{1}{A M} - \frac{1}{B M} \right) - \left( \frac{1}{A N} - \frac{1}{B N} \right) \right]} \frac{\Delta V}{I}$$

$$= K \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots ( 3.2.15 )$$

donde K se le conoce como el factor geométrico del disposi-

tivo, es decir :

$$K = \frac{2 \pi}{\left( \frac{1}{A M} - \frac{1}{B M} \right) - \left( \frac{1}{A N} - \frac{1}{B N} \right)} \dots ( 3.2.16 )$$

el factor geométrico K, varía de acuerdo al dispositivo electródico utilizado. Los dispositivos más ampliamente utilizados en el método eléctrico vertical son el Wenner y Schlumberger.

#### III.2.1.1.- DISPOSITIVO SCHLUMBERGER .

En este dispositivo, los electrodos de potencial se sitúan simétricamente a una distancia (r) del punto central (O) que se denomina centro del dispositivo. Los electrodos de corriente, se encuentran a una distancia variable (L) del punto (O), así los cuatro electrodos quedan alineados sobre una línea de rumbo fijo, como lo muestra la figura # 3.2.2.1

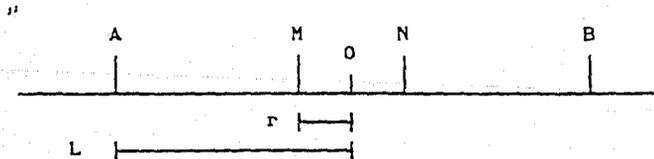


Figura # 3.2.1.- Dispositivo Schlumberger.

este tipo de dispositivo tiene que cumplir con la siguiente relación :

$$\frac{A B}{2} \geq \frac{5 M N}{2}$$

para que el cociente  $\Delta U / 2r$  sea aproximadamente el gradiente del potencial medio en el punto 0 .

El factor geométrico es el siguiente :

$$K = \frac{2 \pi}{\left( \frac{1}{L-r} - \frac{1}{L+r} \right) - \left( \frac{1}{L+r} - \frac{1}{L-r} \right)}$$

$$= \frac{\pi}{2} \frac{L^2 - r^2}{r} \dots \dots \dots ( 3.2.17 )$$

### III.2.1.2.- DISPOSITIVO WENNER .

En este dispositivo se utiliza un conjunto de electrodos dispuestos simétricamente respecto al punto central (0), y se tiene que las distancias entre los electrodos son iguales, ó sea que  $AM = MN = NB = a$  ; como lo muestra la figura # 3.2.1.2.

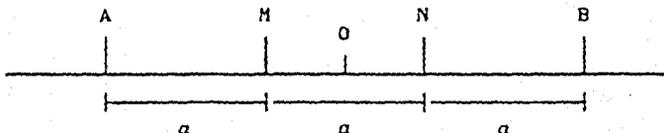


Figura # 3.2.1.2.- Dispositivo Wenner.

su factor geométrico es el siguiente :

$$K = \frac{2 \pi}{\left( \frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) - \left( \frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right)} = 2 \pi a \quad (3.2.18)$$

La formula ( 3.2.15 ) permite el cálculo de la resistividad verdadera para medios homogéneos e isótropos. Si se considerará un medio heterogéneo, al sustituir las mediciones realizadas con el dispositivo electródico en la formula anterior no se obtendrá una resistividad verdadera: por lo que la resistividad obtenida se denomina resistividad aparente. La resistividad aparente depende de la resistividad de los estratos y de la distancia entre los electrodos de potencial y corriente del dispositivo de medición, siendo la variable experimental que representa el resultado de las mediciones en la técnica del sondeo eléctrico vertical.

### III.3.- TEORIA DEL SONDEO ELECTRICO VERTICAL .

#### III.3.1.- INTRODUCCION .

Se le da el nombre de sondeo eléctrico vertical ( SEV ) a la serie de medidas de resistividad aparente (  $\rho_a$  ) realizadas con un mismo dispositivo y separacion creciente entre los electrodos de emisión y recepción conservando fijos el centro y rumbo del dispositivo. Los datos obtenidos son

representados por medio de una curva, a la que se le denomina curva de resistividad aparente. Estas se grafican en papel bilogarítmico representado en el eje de ordenadas la resistividad aparente, y en las abscisas, las distancias electródicas  $AB/2$  ó  $AB/3$ . La finalidad del sondeo eléctrico vertical consiste en determinar la distribución vertical de las resistividades verdaderas para un subsuelo heterogéneo, bajo el centro del sondeo. El subsuelo heterogéneo es representado por un medio horizontalmente estratificado, el cual está formado por dos semiespacios; el semiespacio superior representa la atmósfera, la cual tiene conductividad nula; el semiespacio inferior es un medio heterogéneo compuesto de medios parciales homogéneos e isótropos de extensión lateral indefinida y cuyas superficies de separación son paralelas entre sí al plano aire-tierra. Este medio puede ser descrito especificando el espesor  $E_i$  y la resistividad  $\rho_i$  de cada estrato.

Cada uno de los estratos así definidos se denomina capa geoelectrica, y al conjunto de estos se les denomina corte geoelectrico. Estos se pueden clasificar en función del número de capas y las relaciones entre las resistividades de las mismas, como se describe a continuación :

a).- Los cortes de dos capas, son de dos tipos :

" 1).-  $\rho_1 < \rho_2$

2).-  $\rho_1 > \rho_2$

b).- Los cortes geoelectricos de tres capas, son cuatro tipos :

1).- Tipo H :  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$

2).- Tipo K :  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$

3).- Tipo Q :  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

4).- Tipo A :  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$

c).- Los cortes geoelectricos de cuatro o mas capas son combinaciones de los anteriores, así por ejemplo para cuatro capas se tienen ocho grupos:

1).- Tipo HK

5).- Tipo QQ

2).- Tipo HA

6).- Tipo QH

3).- Tipo KH

7).- Tipo AK

4).- Tipo KQ

8).- Tipo AA

### III.3.2.- SOLUCION DEL PROBLEMA DIRECTO PARA MEDIOS ESTRATIFICADOS.

El problema directo para medios estratificados consiste en la determinación del potencial eléctrico producido en la superficie límite aire-tierra, por una fuente puntual de corriente situada en dicha superficie. Para la solución de este problema existen varios métodos , entre los mas conocidos se tienen los siguientes dos :

a).- Método de las Imágenes .

b).- Solución de la ecuación de Laplace .

#### III.3.2.1.- SOLUCION DE LA ECUACION DE LAPLACE .

"

La solución del problema directo por este método se basa en que la ecuación de Laplace se cumple para todos los puntos de un medio estratificado, exceptuando el origen donde se encuentra colocada la fuente. Para simplificar la ecuación de Laplace se tomará esta en coordenadas cilíndricas, ya que existe simetría con respecto a el eje Z vertical, tomando como origen al electrodo A, y por la misma simetría se anula la

variación de la diferencia de potencial con respecto al ángulo  $\varphi$ , donde la ecuación diferencial nos queda como :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (3.3.1)$$

así luego :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.3.2)$$

Esta ecuación diferencial, se soluciona por medio del método de separación de variables, obteniéndose como solución general del problema :

$$U(r,z) = \int_0^\infty [ \phi(\lambda) e^{-\lambda z} + \psi(\lambda) e^{\lambda z} ] J_0(\lambda r) d\lambda \dots (3.3.3)$$

donde  $\phi(\lambda)$  y  $\psi(\lambda)$  son funciones arbitrarias de  $\lambda$ .

La ecuación ( 3.3.3 ) se modifica tomando ahora en cuenta que el potencial generado por una fuente de intensidad de corriente I en la superficie de un medio eléctricamente homogéneo e isótropo está dado por la ecuación :

$$U(r,z) = \frac{\rho_1 I}{2 \pi \sqrt{r^2 + z^2}} \dots\dots\dots (3.3.4)$$

donde  $\rho_1$  es la resistividad de la primera capa y I, es la intensidad de corriente en este punto. Así la ecuación ( 3.3.4 ) se puede representar en forma similar a la ecuación ( 3.3.3 ) utilizando la integral de Lipschitz :

$$\int e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda \dots\dots\dots (3.3.5)$$

Incorporando la ecuación ( 3.3.5 ) a la ecuación ( 3.3.3 ) la solución de la ecuación en forma general, está dada por :

$$U(r,z) = \frac{\rho_1 I}{2 \pi} \int_0^{\infty} [e^{-\lambda z} + \theta(\lambda)e^{-\lambda z} + \chi(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad \dots\dots (3.3.6)$$

donde  $\theta(\lambda)$  y  $\chi(\lambda)$  son funciones arbitrarias de  $\lambda$ . Esta ecuación es válida en todas las capas del subsuelo, pero las funciones  $\theta(\lambda)$  y  $\chi(\lambda)$  varían para cada capa.

La expresión para el potencial eléctrico en las diferentes capas se puede escribir como :

$$U(r,z) = \frac{\rho_1 I}{2 \pi} \int_0^{\infty} [e^{-\lambda z} + \theta(\lambda)e^{-\lambda z} + \chi_i(\lambda)e^{\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3.3.7)$$

donde  $i$  representa el número de capa en la cual se requiere conocer el potencial eléctrico.

### III.3.3.- ADAPTACION DE LA SOLUCION A LAS CONDICIONES DE FRONTERA .

Las condiciones de frontera que rigen el comportamiento del campo eléctrico en un medio estratificado se describen a continuación :

- a).- El valor del potencial en la interfase entre dos capas adyacentes es continua.
- b).- Las componentes normales del vector de densidad de corriente son continuas en una interfase.
- c).- La resistividad del aire al flujo de corriente eléctrica es infinita y no existirá componente de densidad de corriente normal a la superficie.

d). - A una profundidad infinita el potencial debe aproximarse a cero.

Tomando en cuenta la condición (a), la expresión para el potencial en la interfase entre las capas  $i$  e  $i+1$  debe de ser la misma por lo que :

$$\int_0^{\infty} [\Theta_i(\lambda)e^{-\lambda zi} + X_i(\lambda)e^{\lambda zi}] J_0(\lambda r) d\lambda$$

$$= \int_0^{\infty} [\Theta_{i+1}(\lambda)e^{-\lambda zi} + X_{i+1}(\lambda)e^{\lambda zi}] J_0(\lambda r) d\lambda$$

de aquí se obtiene que :

$$\Theta_i(\lambda)e^{-\lambda zi} + X_i(\lambda)e^{\lambda zi} = \Theta_{i+1}(\lambda)e^{-\lambda zi} + X_{i+1}(\lambda)e^{\lambda zi} \quad (3.3.8)$$

Si aplicamos la segunda condición a la ecuación ( 3.3.6 ) y tomando en cuenta que la componente normal de la densidad de corriente es igual a la derivada del potencial con respecto a  $(z)$ , dividida por la resistividad de la capa, se tiene :

$$\frac{1}{\rho_i} [(1 + \Theta_i(\lambda))e^{-\lambda z} - X_i(\lambda)e^{\lambda zi}] J_0(\lambda r) \lambda d\lambda$$

$$= \frac{1}{\rho_{i+1}} [(1 + \Theta_{i+1}(\lambda))e^{-\lambda zi} - X_{i+1}(\lambda)e^{\lambda zi}] J_0(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (3.3.9)$$

Si la ecuación ( 3.3.6 ) se deriv con respecto a  $Z$  y se sustituye la tercera condición tenemos :

$$\int [-1 - \Theta_i(\lambda) + X_i(\lambda)] J_0(\lambda r) \lambda d\lambda = 0 \quad \dots\dots\dots(3.3.10)$$

De donde el primer término de la ecuación ( 3.3.10 ) nos define el campo existente en un suelo homogéneo e isótropo,

este campo primario satisface automáticamente las condiciones de contorno.

La componente vertical de la intensidad de campo eléctrico del campo perturbador debe de ser cero en la superficie para todos los valores de  $(r)$ , incluyendo el origen donde la fuente puntual se localiza.

Esta condición solo se satisface si los primeros dos términos de la integral son cero, esto lleva a la ecuación :

$$\theta_1(\lambda) = X_1(\lambda) \dots\dots\dots ( 3.3.11 )$$

La última condición nos dice que :

$$U(r) = 0 \\ r \rightarrow \infty$$

Para que se satisfaga esta condición es necesario que :

$$X_N(\lambda) = 0 \dots\dots\dots ( 3.3.12 )$$

El conjunto de ecuaciones ( 3.3.8 ) a ( 3.3.12 ) define un sistema de  $2n$  funciones desconocidas  $\theta_1(\lambda)$  y  $X_1(\lambda)$ .

Para simplificar la expresión de este sistema se utiliza la siguiente notación :

$$u_i = e^{-\lambda z_i} ; \quad v_i = \frac{1}{u_i} = e^{\lambda z_i} ; \quad p_i = \frac{1}{p_{i+1}}$$

El sistema de ecuaciones queda como :

$$\begin{aligned}
 (u_1 + v_1)\theta_1 - u_1\theta_2 - v_1X_2 &= 0 \\
 (v_1 + u_1)\theta_1 + P_1u_1\theta_2 - P_1v_1X_2 &= (1 - P_1)u_1 \\
 u_2\theta_2 + v_2X_2 - u_2\theta_3 - v_2X_3 &= 0 \\
 u_2\theta_2 + v_2X_2 + P_2u_2\theta_3 - P_2v_2X_3 &= (1 - P_2)u_2
 \end{aligned}$$

---


$$\begin{aligned}
 u_{n-1}\theta_{n-1} + v_{n-1}X_{n-1} - u_{n-1}\theta_n &= 0 \\
 -u_{n-1}\theta_{n-1} + u_{n-1}X_{n-1} + P_{n-1}u_{n-1}\theta_n &= (1 - P_{n-1})u_{n-1}
 \end{aligned}$$

La solución de este sistema de ecuaciones puede ser realizada por la regla de Cramer, la cual consiste en obtener el cociente de dos determinantes, donde  $\bar{D}$  es el numerador y  $P$  es el denominador :

$$\theta = \frac{\bar{D}}{P}$$

donde:

$$\bar{D} = \begin{vmatrix}
 (u_1 + v_1) & -u_1 & -v_1 \\
 (v_1 + u_1) & +P_1u_1 & -P_1v_1 \\
 +u_2 & +v_2 & -u_2 & -v_2 \\
 -u_2 & +v_2 & +P_2v_2 & -P_2v_2 \\
 \hline
 u_{n-1} & +v_{n-1} & -u_{n-1} \\
 -u_{n-1} & +v_{n-1} & +P_{n-1}u_{n-1}
 \end{vmatrix}$$

$$P = \begin{vmatrix}
 -u_1 & -u_1 & -v_1 \\
 u_1 & +P_1u_1 & -P_1v_1 \\
 0 & +u_2 & +v_2 & -u_2 & -v_2 \\
 0 & -u_2 & v_2 & +P_2u_2 & -P_2v_2 \\
 \hline
 0 & u_{n-1} & +v_{n-1} & -u_{n-1} \\
 0 & -u_{n-1} & +v_{n-1} & +P_{n-1}u_{n-1}
 \end{vmatrix}$$

Finalmente la ecuación para el potencial eléctrico en la

superficie de la tierra para las condiciones especificadas es :

$$U(r) = \frac{\rho_i I}{2 \pi} \int_0^{\infty} [1 + 2\theta_1(\lambda)] J_0(\lambda r) d\lambda \dots\dots\dots (3.3.14)$$

de donde :

$U$  = Es el potencial en un punto de la superficie.

$I$  = Corriente emitida por la fuente.

$\lambda$  = Variable de integración.

$r$  = Distancia entre el punto de inyección de corriente a el punto de medida.

$J_0$  = Función Bessel de orden cero.

$\theta(\lambda)$  = Función Característica o Kernel.

### III.3.4.- FUNCION CARACTERISTICA O KERNEL .

El concepto de funcion característica ó Kernel fué introducido por primera vez por Slichter en 1933 y la representó como :

$$K(\lambda) = 1 + 2\theta_1(\lambda) \dots\dots\dots (3.3.15.)$$

La función  $\theta(\lambda)$  se denomina como la función característica de Stefanescu, y corresponde a el potencial perturbador debido a la presencia de más de una capa.

Existen varias expresiones que representan la función característica en una forma algebraica más conveniente para su cálculo a estas expresiones se les denomina como ecuaciones de recurrencia.

Una de estas ecuaciones de recurrencia es la de Pekeris, la cual permite obtener la función Kernel de Slichter en la capa

superficial. La fórmula de Pekeris es :

$$K_i = \frac{K_{i+1} + \rho_i \tanh(\lambda t_i)}{\rho_i + K_{i+1} \tanh(\lambda t_i)} \dots\dots (3.3.16)$$

en esta fórmula la función Kernel de la última capa es :

$$K_n = 1$$

y  $t_i$  es el espesor de la i-ésima capa.

Koefoed ( 1970 ) introduce la "Transformada de Resistivida" denotada por  $T_i$ , esta se define como :

$$T_i = \rho_i k_i \dots\dots\dots ( 3.3.17 )$$

la relación de Pekeris queda como :

$$T_i = \frac{T_i - \rho_i \tanh(\lambda t_i)}{\frac{1}{\rho_i} [ 1 + T_{i+1} \tanh(\lambda t_i) ]} \dots\dots ( 3.3.18 )$$

La transformada de resistividad depende de parámetros del corte Geoelectrico y de  $\lambda$ , a su vez es independiente del dispositivo de medición empleado.

III.3.5.- RESISTIVIDAD APARENTE

Conocida la expresión del potencial eléctrico en la superficie de un medio estratificado, entonces para un dispositivo electródico dado se puede obtener la función de resistividad aparente.

Las funciones de resistividad aparente para los diferentes dispositivos es :

a).- **Dispositivo Schlumberger.**- La resistividad aparente para este dispositivo está dada por :

$$\rho_a = \pi r^2 \frac{E}{I} \dots\dots\dots ( 3.3.19 )$$

Sabiendo que :

$$E = \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{I \rho_1}{2 \pi} \int_0^\infty \theta_1(\lambda) J_0(\lambda r) \lambda d\lambda$$

y

$$\frac{\partial J_0(\lambda r)}{\partial r} = - J_1(\lambda r)$$

sustituyendo en ( 3.3.19 )

$$\rho_a = \rho_1 r^2 \int_0^\infty \theta_1(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \dots ( 3.3.20 )$$

b).- **Dispositivo Wenner.**- La resistividad aparente para este dispositivo está dada por :

$$\rho_a = 2 \pi r \frac{\Delta U}{I} \dots\dots\dots ( 3.3.21 )$$

donde (  $\Delta U$  ) es la diferencia de potencial entre puntos situados a las distancias ( r ) y ( 2 r ) de los electrodos de emisión.

$$\Delta U = \frac{I \rho_1}{\pi} \int_0^\infty \theta_1(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda - \frac{I \rho_1}{\pi} \int_0^\infty \theta_1(\lambda) J_0(2\lambda r) d\lambda$$

sustituyendo en ( 3.3.21 ) se obtiene :

$$\begin{aligned} \rho_a &= 2 \rho_1 r \int_0^{\infty} \theta_1(\lambda) J_0(\lambda r) d\lambda - 2 \rho_1 r \int_0^{\infty} \theta_1(\lambda) J_0(2\lambda r) d\lambda \\ &= 2r \int_0^{\infty} T(\lambda) [ J_0(\lambda) - J_0(2\lambda r) ] d\lambda \end{aligned}$$

de donde para los dos dispositivos  $T(\lambda)$  es la transformada de resistividad.

### III.4.- CALCULO NUMERICO DE CURVAS TEORICAS PARA MEDIOS HORIZONTALMENTE ESTRATIFICADOS.

La finalidad del método de resistividad en su modalidad de sondeo eléctrico vertical, es determinar los espesores y resistividades de las capas horizontales que forman el subsuelo, partiendo de los datos de resistividad aparente observados. A este problema se le denomina problema inverso ó interpretación.

La solución del problema inverso puede realizarse empleando distintos métodos, la mayoría de los cuales requiere de un procedimiento para el cálculo numérico de curvas teóricas de resistividad aparente. Para realizar el cálculo numérico de las curvas de resistividad aparente se debe evaluar las ecuaciones obtenidas para la resistividad aparente de diferentes dispositivos electródicos. El método actualmente empleado es el de filtrado lineal, el cual se describe a continuación.

### III.4.1.- METODO DE FILTRADO LINEAL.

Este método puede ser aplicado gracias a la relación lineal que existe entre la función de resistividad aparente y la función de Transformada de Resistividad.

El desarrollo del método de filtrado lineal para el cálculo de las curvas de resistividad aparente parte de las expresiones matemáticas, donde se realiza el cambio de las variables ( r ) y ( λ ) por las variables logarítmicas :

$$x = \log ( r )$$

$$y = \log ( \lambda )$$

Con este cambio la expresión para la resistividad aparente para los dispositivos electrónicos Schlumberger y Wenner asume la siguiente forma :

$$\rho_{a, s}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} T(\lambda) J_1(@^{-x-y}) @^{-2(y-x)} \quad ( 3.4.1 )$$

$$\rho_{a, w}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} T(y) 2 [ J_0(@^x) - J_0(@^{2x}) ] @^x dx \quad ( 3.4.2 )$$

haciendo :

$$h_s( y-x ) = 2 @^{-2(y-x)} J_1(@^{-(y-x)})$$

$$h_w(x) = 2 [ J_0(@^x) - J_0(@^{2x}) ] @^x$$

se obtiene

$$\rho_{a, a}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} T(y) h_a (y - x) dx \quad (3.4.3)$$

$$\rho_{a, v}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} T(y) h_v (x - y) dy \quad (3.4.4)$$

de estas expresiones se puede observar que se tratan de integrales de convolución que relacionan la entrada  $T(\lambda)$  con la salida  $\rho_{a, a}(x)$  y  $\rho_{a, v}(x)$  ó sea :

$$\rho_{a, a}(x) = T(x) * h_a(x) \dots\dots\dots (3.4.5)$$

$$\rho_{a, v}(x) = T(x) * h_v(x) \dots\dots\dots (3.4.6)$$

Para funciones discretas se tienen las expresiones :

$$\rho_{a, a}(x) = \sum_j h_{a, j} T(y_0 + j \Delta y) \quad (3.4.7)$$

$$\rho_{a, v}(x) = \sum_j h_{v, j} T(y_0 + j \Delta y) \quad (3.4.8)$$

De donde  $h_j$  son los valores numéricos de la función del sistema ó filtro inverso de resistividad.

### III.4.2.- INTERPRETACION CUALITATIVA.

La interpretación cualitativa tiene como finalidad obtener una primera idea ó aproximación a la estructura del subsuelo estudiado. En ella no se determinan espesores ni resistividades en valor absoluto, sino relaciones de desigualdad, tales como zonas de profundidad máxima ó mínima de algún horizonte guía, delimitación de áreas de diferentes condicio-

nes geológicas, etc. La interpretación cualitativa se efectúa por medio del trazo de mapas y perfiles que representan la distribución en el espacio de algunas características ó parámetros de las curvas de SEV obtenidas en la campaña de exploración. Los métodos para la interpretación son diversos, como son los mapas de tipos de curvas, ó mapas de conductancia longitudinal, mapas de isorresistividades aparentes, perfiles de curvas de resistividad aparente y por último el método de perfiles de isorresistividades aparentes, que fué el utilizado en este estudio y que consiste en unir los puntos de igual resistividad aparente en un perfil, asignando los valores de resistividad aparente a un punto determinado de abertura electródica  $AB/2$  ó  $AB/3$  en la línea vertical del perfil usando escala logarítmica. Sobre una línea horizontal en escala lineal se localizan la posiciones de los sondeos.

Las líneas que unen puntos de igual resistividad aparente se denominan isorresistivas.

#### III.4.3.- INTERPRETACION CUANTITATIVA.

El objetivo de la interpretación cuantitativa consiste en determinar las resistividades eléctricas y espesores del corte geoelectrico para cada sondeo eléctrico vertical. Existen diferentes métodos los cuales se pueden dividir en métodos gráficos y métodos automáticos. A continuación se describirá brevemente los métodos utilizados en este estudio que son :

##### a ).- Métodos Gráficos.

- 1 ).- Método de superposición.
- 2 ).- Método de reducción.

b).- Métodos de interpretación iterativa automática.

1).- Método de mínimos cuadrados.

2).- Método de gradiente.

Para realizar la interpretación cuantitativa en este estudio, se utilizaron los métodos gráficos para obtener una primera aproximación, para después utilizar los métodos iterativos automáticos para obtener una interpretación más exacta.

#### III.4.3.1.- METODOS GRAFICOS .

a).- Método de Superposición .

Este método consiste en la comparación de las curvas obtenidas en campo con curvas teóricas de un catálogo, de tal manera que se encuentre alguna curva idéntica a la de campo.

Así por ejemplo, si se toma un corte geoelectrónico de dos capas el proceso de interpretación es el siguiente :

1).- Se dibuja la curva de resistividad aparente observada en un papel transparente bilogarítmico.

2).- Se coloca el papel transparente sobre la familia de curvas teóricas de dos capas y se desplaza sobre ella, conservando el paralelismo de sus ejes, hasta que coincide con alguno de sus ejes.

3).- Se marca la cruz de la curva teórica, esta indica el espesor y resistividad de la primera capa ( $E_1, \rho_1$ ) las cuales son las coordenadas de la cruz en el gráfico bilogarítmico.

4).- Se encuentra la resistividad de la segunda capa multiplicando el valor  $\rho_1$  por la relación  $\rho_1/\rho_2$  de la curva patrón.

Quando las curvas de resistividad aparente representan a

medios de más de dos capas, se procede a determinar  $\rho_1$  y  $E_1$ , y posteriormente se obtienen los demás parámetros multiplicando estos valores por las relaciones  $E_2/E_1$ ,  $\rho_2/\rho_1$ , etc., de las curvas patrón. Este método tiene la gran desventaja de que no existe un número tal de diagramas de curvas que cubran la cantidad de casos posibles que se pueden obtener en las curvas observadas.

b) .- *Método de Reducción.* - Este método es una técnica gráfica empírica en la que las curvas interpretadas por segmentos utilizando las curvas teóricas de dos capas, la idea básica del método es, que conforme cada porción de la curva es interpretada. Las capas del medio estratificado correspondientes al segmento interpretado son combinadas teóricamente para formar una sola capa ficticia homogénea e isotrópica. Este procedimiento requiere del uso de diagramas de curvas auxiliares, junto con las colecciones de curvas teóricas de dos y tres capas.

#### III.4.3.2.- METODOS DE INTERPRETACION ITERATIVA AUTOMATICA.

Los métodos iterativos automáticos de interpretación, consisten en que la curva de resistividad aparente observada es comparada con la curva teórica obtenida de un modelo geoelectrico dado. Si la diferencia entre ambas no es satisfactoria, entonces los parámetros del modelo geoelectrico se modifica. Este procedimiento se repite hasta que se obtiene una similitud adecuada entre las curvas observada y teórica. En la actualidad estos métodos son, posiblemente, los más empleados en la interpretación cuantitativa de curvas de sondeos eléctricos verticales. La diferencia fundamental entre los distintos métodos automáticos iterativos

está en el procedimiento usado para la optimización de la función de error. Los métodos comunmente empleados son :

a).- Método de Mínimo Cuadrados.

Este método consiste en determinar el parámetro del corte ( $E_K, \rho_K$ ) que minimice la suma de los cuadrados de la diferencia entre los valores observados  $\rho_{\alpha \text{ OBS.}}$  y los calculados  $\rho_{\alpha \text{ CAL.}}$ , es decir :

$$E^2 = \sum_{j=1}^m (\rho_{\alpha \text{ OBS.}, j} - \rho_{\alpha \text{ CAL.}, j})^2 \dots\dots\dots (3.4.9)$$

de donde  $\rho_{\alpha \text{ CAL.}}$  es una función lineal la cual se logra al tomar la serie de Taylor hasta su primera derivada, obteniendo :

$$\rho_{\alpha \text{ CAL.}, j} (P_{i+1}) = \rho_{\alpha \text{ CAL.}, j} (P_i) + \sum_{K=1}^{2n-1} \frac{\partial \rho_{\alpha \text{ CAL.}, j}}{\partial P_K} \Delta P_K \dots\dots\dots (3.4.10)$$

donde  $P_K$  es la variable que se refiere a cualquiera de los parámetros del corte y  $\Delta P_K$  es el factor de corrección.

Sustituyendo la expresión ( 3.4.10 ) en ( 3.4.9 ) tenemos :

$$E^2 = \sum_{j=1}^m (\rho_{\alpha \text{ OBS.}, j} - \rho_{\alpha \text{ CAL.}, j} (P_i) - \sum_{K=1}^{2n-1} \frac{\partial \rho_{\alpha \text{ CAL.}, j}}{\partial P_K} \Delta P_K)^2 \dots\dots\dots (3.4.11)$$

para minimizar el error se tiene que cumplir la condición :

$$\frac{\partial E}{\partial \Delta P_L} = 0 \quad L = 1, 2, 3, 4, \dots, K, \dots, 2N - 1$$

de donde se obtiene :

$$\sum_{k=1}^{2N-1} \Delta P_k \sum_{j=1}^m \frac{\partial \rho_{\alpha \text{ CAL. } j}}{\partial P_k} \frac{\partial \rho_{\alpha \text{ CAL. } j}}{\partial P_k} =$$

$$= \sum_{j=1}^m \frac{\partial \rho_{\alpha \text{ CAL. } j}}{\partial P_k} ( \rho_{\alpha \text{ OBS. } j} - \rho_{\alpha \text{ CAL. } j} ) \quad (3.4.12)$$

Estas ecuaciones son las llamadas normales, que en forma matricial se representan como :

$$J^T J \Delta P = J^T D \quad \dots \dots \dots (3.4.13)$$

donde J es la matriz Jacobiana de orden [ n x (2n-1) ] que contiene las derivadas parciales con respecto a los parámetros del corte, J<sup>T</sup> es la matriz transpuesta de J, ΔP es el vector de corrección y D es el vector diferencia entre los valores ρ<sub>α OBS</sub> y ρ<sub>α CAL</sub>. Resolviendo para ΔP se tiene :

$$\Delta P = ( J^T J )^{-1} J^T D \quad \dots \dots \dots (3.4.14)$$

Esta expresión es modificada por Marquart ( 1963 ), agregando un término ( α ) a los elementos de la matriz J<sup>T</sup>J con el fin de que no produzca resultados equivocados , debido a que la matriz cuadrada J<sup>T</sup>J en todos sus valores de la diagonal principal ( eigenvalores ) son mayores a cero, aunque es posible que en uno ó en varios eigenvalores estos sean cercanos a cero, lo cual produciría los resultados equivocados.

Refiriéndonos al término ( α ) es conveniente utilizar un

(  $\alpha$  ) grande en las primeras interacciones y cuando se logre llegar a un intervalo de convergencia pequeño, es preferible usar la ecuación ( 3.4.15 ) manteniendo el valor de (  $\alpha$  ) cercano a cero. La manera de seleccionar (  $\alpha$  ) depende del comportamiento de  $E^2$ , y para aumentar (  $\alpha$  ) se multiplica por un valor constante de diez y para disminuirlo se divide entre dos, como lo sugiere Koefoed ( 1979 ). Por lo tanto la ecuación modificada nos queda como :

$$\Delta P = ( J^T J + \alpha I )^{-1} J^T D \quad \dots\dots ( 3.4.15 )$$

donde I es la matriz identidad.

En resumen la técnica de interpretación consiste en :

- 1 ).- Proponer un modelo inicial  $P_0$ , de resistividades y espesores, y un valor de (  $\alpha$  ) inicial.
- 2 ).- Hallar la matriz Jacobiana de orden (  $m \times ( 2n-1 )$  ).
- 3 ).- Hallar la matriz cuadrada  $J^T J$  de orden  $( 2n-1 ) \times ( 2n-1 )$ .
- 4 ).- Calcular  $\Delta P$  al aplicar la ecuación ( 3.4.15 ).
- 5 ).- Hallar  $P_{i+1} = P_i + \Delta P_i$ .
- 6 ).- Comparar  $E_{i+1}^2$  con  $E_i^2$ . Si el criterio de mínimos cuadrados se ha satisfecho, hemos obtenido el resultado correcto y se detiene el proceso.
- 7 ).- Si el criterio del punto ( 6 ) no se ha satisfecho, seleccionar una nueva (  $\alpha$  ) e iniciar nuevamente desde el punto ( 2 ).

8 ).- *Método de Gradiente.*

El método de gradiente es un procedimiento de optimización de funciones no lineales. La esencia del método es que la función de error se relaciona enteramente con los parametros del corte geoelectrico. Para la determinación de

la función de error se han obtenido diferentes criterios, como son los propuestos por diferentes autores como Vozoffk ( 1984 ), Bichara y Larshaman ( 1976 ), Koefoed O. ( 1979 ) y Tejero ( 1984 ). En la actualidad , la definición más aceptada para la función de error, es la del error cuadrático logarítmico dado por :

$$E^2 = \sum_{i=1}^N ( \text{LN } \rho_{a c_i} - \text{LN } \rho_{a M_i} )^2 \quad ( 3.4.16 )$$

donde :

- $E^2$  = Error cuadrático logarítmico .
- $\rho_{a c_i}$  = Resistividad aparente obtenida en el campo .
- $\rho_{a M_i}$  = Resistividad aparente del modelo calculado .
- $N$  = Total de muestras obtenidas en el campo .

La optimización de la función de error consiste en que los cambios de los parametros del modelo geoelectrico se realiza en forma proporcional a la magnitud de los componentes del gradiente de la función de error, es decir :

$$P_{k+1} = P_k - C \frac{\partial E^2}{\partial P_k} \dots\dots\dots ( 3.4.17 )$$

donde :

- $P_k$  = Parámetro geoelectrico a cambiar .
- $P_{k+1}$  = Nuevo valor del parámetro geoelectrico .
- $C$  = Longitud de paso .
- $\frac{\partial E^2}{\partial P_k}$  = Dirección del gradiente de error .

La determinación de la dirección del gradiente de error y de la longitud de paso, marcan los aspectos fundamentales del

método propuesto, y que a continuación se describen.

La evaluación de la dirección del gradiente se realiza partiendo de la consideración de que el error será evaluado en forma logarítmica ( 3.4.16 ) y derivando dicha expresión con respecto al logaritmo de los parámetros se tiene :

$$\frac{\partial E^2}{\partial \text{LNP}_k} = - 2 \sum_{i=1}^N ( \text{LN } \rho_a C_i - \text{LN } \rho_a M_i ) \frac{\partial \rho_a M_i}{\partial P_k} \quad ( 3.4.17 )$$

La ecuación anterior representa las componentes del gradiente de la función de error respecto a cada uno de los parámetros del modelo geoelectrico, es decir, la dirección de máxima variación sobre la función de error .

En forma logarítmica los parámetros geoelectricos modificados estarán dados por :

$$\text{LN } P_{k+1} = \text{LN } C \frac{\partial E^2}{\partial \text{LNP}_k} \dots\dots\dots ( 3.4.18 )$$

y por lo tanto los nuevos parámetros en forma lineal se establecerán mediante las siguiente ecuación :

$$\text{LN } P_{k+1} = P_k e^{-c \bar{v}} \dots\dots\dots ( 3.4.19 )$$

donde :

C = Longitud de paso .

$\bar{v}$  = Dirección propuesta

Para la evaluación de la longitud de paso ( C ) existen infinidad de formas, de los cuales se describirá únicamente el utilizado en este trabajo, el cual se refiere al método de interpolación cuadrática, debido basicamente a las siguientes

ventajas que son :

- *Facilidad y rapidez de evaluación .*
- *Incrementa la eficiencia del método de inversión .*
- *Evita la determinación de parámetros de difícil evaluación.*

El método de interpolación cuadrática se desarrolla al tener los modelos geoelectricos  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  evaluados para los valores  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  de la longitud de paso  $C$  en la vecindad del mínimo  $E(C)_{mín}$ , es decir sí :

$$P_1 = P_0 + C_1 \frac{\partial E^2}{\partial P_0}$$

$$P_2 = P_0 + C_2 \frac{\partial E^2}{\partial P_0} \quad ( 3.4.20 )$$

$$P_3 = P_0 + C_3 \frac{\partial E^2}{\partial P_0}$$

donde  $P_0$  es el modelo geoelectrico base, entonces la variación de la función de error evaluada en  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  puede considerarse independiente del modelo geoelectrico base, y será representada exclusivamente en términos de la longitud de paso ( $C$ ), como se muestra en la figura III.4.1.

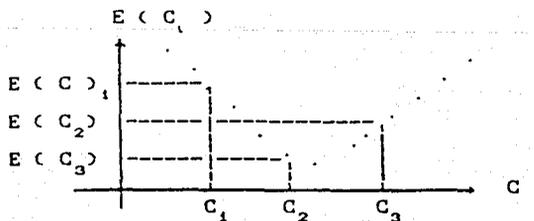


FIGURA III.4.1 .- Interpretación gráfica del método de interpolación cuadrática.

Por lo tanto la determinación de la longitud de paso óptimo que permite determinar el valor de P que minimiza la función de error, puede lograrse al ajustar una parábola a través de  $E(C_1)$ ,  $E(C_2)$  y  $E(C_3)$  de tal manera que :

$$\begin{aligned} E(C_1) &= a + \delta c_1 + d c_1^2 \\ E(C_2) &= a + \delta c_2 + d c_2^2 \\ E(C_3) &= a + \delta c_3 + d c_3^2 \end{aligned} \quad (3.4.21)$$

donde  $a$ ,  $\delta$ , y  $d$  pueden determinarse en términos de  $E(C_1)$ ,  $E(C_2)$  y de  $E(C_3)$ .

El mínimo de  $E(C)$  ocurre en :

$$E'(C) = \delta + 2dc = 0$$

ó

$$c = -\frac{\delta}{2d} \quad \text{con tal de que } d > 0$$

Si se denota este punto como  $C_4$ . El  $E(C_4)$  puede calcularse a partir de la fórmula original, repitiéndose la interpolación cuadrática con los puntos más próximos a el, de entre los tres puntos anteriores  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ .

### III.5.- TRABAJOS DE CAMPO .

Este estudio se realizó a fines de 1979 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos ( S.A.R.H.), de Aguascalientes, con el objeto de conocer la estructura del subsuelo en la zona de los Llanos, prestando especial atención a las capas permeables captadas por los pozos

exploratorios profundos perforados por la Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas.

Los trabajos de campo consistieron en la realización de 63 sondeos eléctricos verticales (S.E.V.). El tipo de sistema empleado en el desplazamiento de electrodos fué el método Wenner. Para el objetivo de estudio, se obtuvieron en cada sondeo 41 mediciones de resistividad aparente para las distancias electródicas  $AB/3$ : 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 72, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 240, 280, 320, 360, 400, 480, 560, 640, 720, 800, 880, 960, 1040, 1120, 1200, 1280, y 1360.

A continuación se describen cada una de las líneas de que constó este estudio Geoeléctrico. ( Ver plano # 2)

#### LINEA A - A'

Esta línea esta compuesta por 11 sondeos, y tiene una longitud de 21 Km. La línea se entrelaza con los perfiles F - F' y E -E' en el sondeo 18 y también con el perfil D - D' en el sondeo 15.

#### LINEA B - B'

Tiene un desarrollo de 15.8 Km. y consta de 10 sondeos, la línea tiene un rumbo aproximado N 60°E. Es cortada por los perfiles C - C' en el sondeo 106 y por G - G' en el sondeo 109.

#### LINEA C - C'

Esta línea cruza la zona de estudio de norte a sur con un rumbo aproximado N 10°W entre los sondeos 201 y 207, después su rumbo cambia a N 27°E. El perfil consta de 13 sondeos y tiene una longitud de 19.3 Km. Es cortado por las

líneas B - B' en el sondeo 106 y en el sondeo 204 por eperfil E - E' y por la línea D - D' en el sondeo 205.

#### LINEA D - D'

La línea tiene una longitud de 7.2 Km. y se compone de 4 sondeos, es cortada por las líneas A - A' en el sondeo 15, y en el 205 por la línea C - C'. El rumbo aproximado esta es de N 45°W.

#### LINEA E - E'

Esta línea cruza la zona de estudio de oeste a nor-este, tiene un rumbo aproximado S 82°E del sondeo 401 al sondeo 204, después su rumbo cambia a N 47°E. Este perfil consta de 12 sondeos, su longitud es de 19.8 Km. El perfil A - A' lo cruza en el sondeo 18, y los perfiles C - C' y G - G' en los sondeos 204 y 609 respectivamente.

#### LINEA F - F'

Esta línea tiene un rumbo aproximado N 70° W, con una longitud de 9 Km. y un total de 4 sondeos. El perfil A - A' la cruza en el sondeo 10 y el perfil B - B' la corta a 300 metros del sondeo 28.

#### LINEA G - G'

La línea G - G' se encuentra localizada al oeste de la zona de estudio, su rumbo es N 22°E. Está compuesta por 10 sondeos y tiene una longitud de 14.7 Km.. Corta a los perfiles B - B' y E - E' en los sondeos 109 y 609 respectivamente.

### III.6- RESULTADOS OBTENIDOS .

Una vez terminados los trabajos de campo, la información obtenida fue representada en perfiles de isorresistividades aparentes en papel bilogarítmico transparente.

La interpretación de la información geoelectrica en el área de estudio se dividió en dos partes :

- 1).- Interpretación Cualitativa.
- 2).- Interpretación Cuantitativa.

La interpretación cuantitativa consistió en la obtención de los parámetros geoelectricos de cada uno de los SEV, así como su integración en perfiles de resistividades reales ó verdaderas. La interpretación cuantitativa se realizó en tres etapas.

#### PRIMERA ETAPA.

Una vez dibujadas las curvas de resistividad aparente en función de la separación de electrodos, se procedió a interpretarlas por medio de métodos gráficos ( superposición y reducción ). Para esto se utilizaron las colecciones de curvas Teóricas del Album de Orellana y Mooney ( 1966 ) además del Album de Rijwaterstaat publicado por la EAEG ( 1969 ).

#### SEGUNDA ETAPA.

La segunda etapa consistió en la obtención de la curva teórica de resistividad aparente para cada medio estratificado interpretado, usando en el cálculo numérico el método de filtrado lineal.

El programa utilizado para la solución del problema

directo fué el programa *FILTRO*, este programa igual que los demás programas utilizados en este trabajo pertenecen a un paquete de programas con que cuenta el departamento de Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M..

Una vez obtenidas las curvas teóricas de resistividad aparente se compararon con las curvas de campo correspondientes, esta comparación permite decidir si fue adecuada la interpretación por métodos gráficos.

### *TERCERA ETAPA.*

La interpretación fue repetida utilizando métodos automáticos iterativos, para esto se utilizaron los programas *INVNOSIN* y *GRADYIN*. El programa *INVNOSIN* utiliza el método de optimización de error de Mínimos Cuadrados, mientras que el programa *GRADYIN* utiliza el método de Gradiente.

Tanto el programa *INVNOSIN* como el *GRADYIN* requieren como datos de entrada; el número de capas, número de aberturas electródicas, dispositivo empleado, error mínimo, número de iteraciones y el número del sondeo, así como aberturas electródicas y resistividad aparente de campo para cada abertura y finalmente el modelo geoelectrico inicial.

Como datos de salida los programas proporcionan; el modelo geoelectrico final, las aberturas electródicas, resistividad aparente de campo y teórica para el modelo geoelectrico modificado, así como el error obtenido y el número de iteraciones realizadas.

Los resultados obtenidos por el programa *INVNOSIN* coincidieron en su mayoría con los resultados obtenidos por el programa *GRADYIN*.

A continuación se describirá para cada una de las líneas

de estudio la información geoelectrica obtenida a partir de la interpretacion cualitativa realizada con los metodos de interpretacion cuantitativa obtenidos con los metodos descritos anteriormente .

#### LINEA A - A'

Esta seccion esta formada por 11 sondeos, del 11 al 21, y en esta linea se observo lo siguiente :

Entre los sondeos 16 al 21, se observaron 3 capas correlacionables entre los sondeos, en donde la primera capa tuvo un rango de resistividades entre los 20 y 40  $\Omega$ -m. y con un espesor promedio de 40 metros, teniendo un espesor maximo de 70 metros en el sondeo 20. La segunda capa geoelectrica

presento resistividades de 11 a 25  $\Omega$ -m. con un espesor promedio de 230 metros. Finalmente en la tercera capa geoelectrica se observaron resistividades que varian en un rango de 83 a 500  $\Omega$ -m.

En esta misma seccion del sondeo 16 al 13, se observaron discontinuidades laterales entre los modelos geoelectricos, lo cual hace suponer la existencia de un sistema de fallas normales, que provocaron un escalonamiento. Asi mismo entre los sondeos 12 y 13 se observo otra discontinuidad lateral, que cual hace suponer la existencia de una falla inversa, donde se localiza el bloque de techo bajo los sondeos 11 y 12.

Con respecto a los parametros geoelectricos de las capas dentro del sistema de fallas normales e inversa se observaron parametros analogos en resistividades y espesores con las capas entre los sondeos 16 al 21 .

## LINEA B - B'

La sección B - B' la forman los sondeos 101 al 110. Esta sección presenta tres capas geoelectricas, donde la primera capa en el sondeo 101 presenta un espesor muy pequeño de 15 m y resistividad de 107  $\Omega$ -m. En la segunda capa tiene espesor de 350 m y resistividad de 18  $\Omega$ -m. La tercera capa presenta una resistividad de 292  $\Omega$ -m.

Entre los sondeos 101 y 102 se observa una discontinuidad lateral, producto de una falla normal, donde el bloque de piso se encuentra en el sondeo 101 y el bloque de techo se encuentra entre los sondeos 102 al 108 .

Tomando en cuenta la parte del perfil entre los sondeos 102 al 108, se tienen tres capas geoelectricas; donde la primera capa alcanza una resistividad de 24 a 110  $\Omega$ -m. y un espesor promedio de 40 metros. La segunda capa geoelectrica un espesor promedio de 215 metros, teniendo un espesor máximo de 350 metros localizado en el sondeo 107 . Asi tambien la segunda capa tiene una variación de resistividades de 7 a 19  $\Omega$ -m . Por último la tercera capa geoelectrica presenta una resistividad de 136 a 276  $\Omega$ -m.

Entre los sondeos 108 y 109 se observa una discontinuidad lateral debido a una falla normal con lo cual el bloque de piso se localiza en el sondeo 108, así mismo en este sondeo se observaron cuatro capas geoelectricas, de donde la primera capa presenta una resistividad de 12  $\Omega$ -m. y un espesor de 63 metros. La segunda capa tiene una resistividad de 113  $\Omega$ -m. y un espesor de 150 metros. La tercera capa registra una resistividad de 12  $\Omega$ -m. y un espesor máximo de 650 metros y por último la cuarta capa presenta una resistividad de 114  $\Omega$ -m.

Entre los sondeos 109 y 110 se observa otra discontinuidad

lateral debido a una falla normal en la que el bloque de piso se localiza en el sondeo 110. Se puede observar que en el sondeo 110 se presentan cuatro capas geoeléctricas, aquí la primera capa tiene una resistividad de 11  $\Omega$ -m. con un espesor de 20 metros; la segunda capa presenta una resistividad de 57  $\Omega$ -m. y un espesor de 330 m. La tercera capa registra una resistividad de 2  $\Omega$ -m. y un espesor de 75 metros y por último la cuarta capa tiene una resistividad de 99  $\Omega$ -m.

#### LINEA C - C'

Esta línea está formada por los sondeos 201 al 212. Entre los sondeos 201 y 202 se obtuvieron cinco capas geoeléctricas, donde la primera capa tiene una resistividad de 37 a 50  $\Omega$ -m. ésta capa es correlacionable con la primera capa existente entre los sondeos 203 al 208. Para la segunda capa que se tiene entre los sondeos 201 y 202 presenta una resistividad de 2 a 4.6  $\Omega$ -m. y un espesor de 40 m. En la tercera capa se tiene una resistividad de 270 a 354  $\Omega$ -m. y espesor aproximadamente de 90 m. En las capas descritas anteriormente se presenta una transición eléctrica entre los sondeos 202 y 203, haciendo suponer que es debido a una discontinuidad lateral; la segunda capa se interrumpe completamente, mientras que la tercera capa aparece nuevamente siendo correlacionable con la segunda capa geoeléctrica de los sondeos 204 al 208, aquí es donde esta capa se presenta con resistividad de 103 a 289  $\Omega$ -m. y espesor promedio de 80 metros. Para la cuarta capa entre los primeros sondeos, se tiene un estrato de resistividad de 17 a 52  $\Omega$ -m. y espesor variable de 40 a 300 metros. Esta capa es correlacionable con la segunda capa de los sondeos 203 y 112 y con la tercera capa de los sondeos 204 a 208. La última

capa geoelectrica, presenta una resistividad que varia de 176 a 383  $\Omega$ -m.

En esta linea se tiene una discontinuidad lateral entre los sondeos 208 y 209, producto de una falla normal, en la cual el bloque de piso corresponde al sondeo 208. Del sondeo 209 al 212 se presentan cinco capas geoelectricas, de las cuales la primera tiene una resistividad promedio de 19  $\Omega$ -m. y espesor promedio de 50 metros. La segunda capa tiene una resistividad de 53 a 126  $\Omega$ -m. con un espesor promedio de 55 metros. En la tercera capa se observa una discontinuidad lateral, donde esta capa en el sondeo 209 presenta una resistividad de 288  $\Omega$ -m. y espesor de 115 metros, mientras que en el sondeo 210 la tercera capa presenta una resistividad de 37  $\Omega$ -m y un espesor de aproximadamente 30 metros. Esta misma capa llega a perderse en los sondeos 211 y 212. Para la cuarta capa se tuvieron resistividades de 20 a 49  $\Omega$ -m. y espesor promedio de 280 metros. Y por ultimo la quinta tiene resistividades de 176 a 392  $\Omega$ -m.

#### LINEA D - D'

A esta linea la forman los sondeos 15, 304, 303, 302, 301 y 205. Se presenta una discontinuidad lateral entre los sondeos 15 y 304, tambien entre los sondeos 304 y 303, esto debido a un sistema de fallas normales, lo que provocó un escalonamiento de bloques entre estos sondeos. En el sondeo 15 se tienen varias capas de resistividades muy altas, lo cual hace suponer la existencia de una sola capa geoelectrica con resistividad promedio de 400  $\Omega$ -m. En el sondeo 304 se observan tres capas donde la primera capa registra una resistividad de 167  $\Omega$ -m. y un espesor de 60 metros. La segunda capa presenta una resistividad de 65  $\Omega$ -m. con un

metros. La segunda capa presenta una resistividad de 65  $\Omega$ -m. con un espesor de 115 metros y la tercera capa tiene una resistividad de 314  $\Omega$ -m.

Continuando con esta línea se observa la existencia de cuatro capas geoelectricas del sondeo 303 al 205, las dos primeras capas del sondeo 303 no son correlacionables con las dos primeras capas de los siguientes sondeos. La primera capa del sondeo 303 presenta una resistividad de 192  $\Omega$ -m. y espesor de 50 metros, la segunda capa tiene una resistividad de 346  $\Omega$ -m y un espesor de 55 metros. La tercera capa muestra continuidad lateral hacia los demás sondeos, tiene una resistividad de 56 a 77  $\Omega$ -m. y un espesor promedio de 150 metros. La cuarta y última capa existente en todo el perfil, presenta una resistividad de 208 a 391  $\Omega$ -m. Las dos primeras capas localizadas en los sondeos 302 al 205 presentan resistividades de 12.8 a 15  $\Omega$ -m y de 95 a 131  $\Omega$ -m. y espesores promedio de 35 y 40 metros, respectivamente.

#### *LINEA E - E'*

Esta sección consta de 15 sondeos los cuales son : 401, 8, 402, 403, 404, 405, 406, 204, 407, 408, 409, 410, 411, 412 y 120. Entre los sondeos 401 al 403 se observan transiciones resistivas eléctricas producto de discontinuidades de las capas geoelectricas.

En el sondeo 401 se presentan cinco capas, donde la primera tiene una resistividad de 44  $\Omega$ -m. y es correlacionable con la primera capa de toda esta parte del perfil. La segunda capa del mismo sondeo, presenta una resistividad de 3  $\Omega$ -m. y espesor de 15 metros. La tercera capa registra una resistividad de 159  $\Omega$ -m. y espesor de 40 metros, las dos capas anteriores se interrumpen bajo el

sondeo 8, para aparecer nuevamente en los sondeos 402 y 403 donde presentan una resistividad de 8 a 16  $\Omega$ -m. y espesor de 60 metros. La segunda y tercera capa de los sondeos 402 y 403 se presentaron con una resistividad de 52 a 92  $\Omega$ -m., y espesor de aproximadamente de 100 metros. Ahora continuando con el sondeo 401 su cuarta capa tiene una resistividad de 14  $\Omega$ -m. y se correlaciona con la segunda capa del sondeo 8 y con la cuarta capa del sondeo 402 teniendo un espesor promedio de 170 metros. La última capa, se correlaciona con todos los sondeos de esta parte de la línea, se presentó con una resistividad de 151 a 228  $\Omega$ -m.

Entre los sondeos 403 y 404 se observa una discontinuidad lateral, debido a una falla del tipo normal, donde el bloque de piso se localiza en el sondeo 404. Para los sondeos 404 al 408, se presentan tres capas: la primera capa tiene una resistividad de 26 a 70  $\Omega$ -m. y un espesor promedio de 80 metros. La segunda capa registra una resistividad de 7 a 31  $\Omega$ -m y un espesor promedio de 90 m. Por último la tercera capa tiene una resistividad de 104 a 425  $\Omega$ -m.

Sobre esta misma línea entre los sondeos 408 y 409 se observa otra discontinuidad lateral, producto de una falla normal, donde el bloque de piso se localiza en el sondeo 408. Entre los sondeos 409 y 412 se detectan cuatro capas: En la primera se presenta una resistividad de 11 a 18  $\Omega$ -m. y espesor promedio de 50. La segunda capa tiene una resistividad de 22 a 78  $\Omega$ -m. y espesor promedio de 110 metros. La tercera capa presenta una resistividad de 9 a 15.7  $\Omega$ -m. y un espesor de aproximadamente 350 m. La cuarta y última capa, se registra con una resistividad de 108 a 168  $\Omega$ -m.

Entre el sondeo 412 a 120 existen también una

discontinuidad producto de una falla de tipo normal, de tal manera que el bloque de techo que corresponde a los sondeos 409 al 412 sufrió un hundimiento.

#### LINEA F - F'

La línea está formada por los sondeos 25, 26, 20, 27, y 28. Entre los sondeos 25 y 26, y 26 y 20 se observan transiciones eléctricas debido a las discontinuidades de las capas geoelectricas superiores. Así por ejemplo en el sondeo 25 se presentan cuatro capas, aquí la primera presenta una resistividad de 171  $\Omega$ -m. y espesor de 35 m., la segunda capa tiene una resistividad de 94  $\Omega$ -m. y un espesor promedio de 270 metros, teniendo un espesor máximo de 500 metros en el sondeo 25. La última capa del sondeo 25 es correlacionable con la tercera capa de los sondeos 26 y 20, y tiene una resistividad de 120 a 207  $\Omega$ -m. Las capas superiores de los sondeos 26 y 20, muestran discontinuidad lateral; la primera capa del sondeo 26 tiene una resistividad de 55  $\Omega$ -m. y un espesor de 40 metros; y la primera capa del sondeo 20 tiene una resistividad de 20  $\Omega$ -m. y un espesor de 70 metros.

Entre los sondeos 20 y 27 se encuentra una discontinuidad lateral, producto de una falla normal, localizándose el bloque de piso en el sondeo 27. Entre los sondeos 27 y 28 existen cuatro capas geoelectricas: La primera capa presenta una resistividad de 6 a 15  $\Omega$ -m. y un espesor promedio de 60 m. La segunda capa presenta una resistividad de 20 a 22  $\Omega$ -m y un espesor promedio de 50 m. Para la tercera capa se obtuvo una resistividad de 7 a 14  $\Omega$ -m. y un espesor promedio de 100 metros. La cuarta y última capa presenta una resistividad de 132 a 441  $\Omega$ -m.

**LINEA G - G'**

Esta línea está constituida por los sondeos 601, 602, 603, 604, 109, 605, 606, 607, 608, 609 y 610.

La sección presenta cuatro capas geoeléctricas, con algunas variaciones laterales. La primera capa tiene un rango de resistividades de 7 a 17  $\Omega$ -m. y un espesor promedio de 35 m. La segunda capa la constituye un estrato de resistividades entre 29 y 109  $\Omega$ -m. y un espesor promedio de 220 m., teniendo un espesor máximo de 360 metros bajo el sondeo 606. La tercera capa, presenta un rango de resistividades de 7 a 17  $\Omega$ -m. y un espesor promedio de 230 metros, y por último la cuarta capa tiene una resistividad de 30 a 86  $\Omega$ -m.

”

## CAPITULO IV

### INTEGRACION DE LA INFORMACION GEOLOGICA Y GEOFISICA .

Una vez realizada la interpretación cuantitativa de las curvas de resistividad aparente, la cual se representa por las secciones de resistividades verdaderas, se prosiguió a buscar la relación existente entre la interpretación geofísica obtenida y la información geológica recopilada del área de estudio.

La información geológica recopilada que sirvió de apoyo para la realización de la correlación geológica-geofísica, consistió principalmente en los cortes litológicos de 16 pozos perforados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos ( S.A.R.H. ), así como los planos geológicos del estado de Aguascalientes, carta especial, escala 1 : 250 000 y 1 : 50 000 con claves F13-D19 y F13-D14 , publicado por el I.N.E.G.I. . Tomando en cuenta toda la información geológica y geofísica se pudieron determinar tres unidades geoelectricas diferentes ; las cuales se describen a continuación :

#### UNIDAD $U_1^A$

„ Se encuentra constituida principalmente por rellenos terciarios, entre los que está la Unidad Arenisca-Conglomerado, así como, gravas y arenas empacadas en arcillas que se pudieron observar en los pozos PAB 10 ( sondeo 401 ), SAA 11 ( sondeo 12 ), SAA 1 ( sondeo 18 ) y PAB 35 .

En esta unidad también se agrupan las tobas y riolitas que se encuentran muy alteradas y fracturadas; éstas rocas fueron detectadas por los pozos ITA 20 ( sondeo 108 ), La Unión # 2 ( sondeo 204 ) y los Conos # 8 ( entre los sondeos 409 y 410 ).

La consideración de las rocas volcánicas ácidas dentro de ésta unidad, se debe a que el intenso fracturamiento y alteración que presentan las convierten en rocas permeables, que al estar saturadas presentan bajas resistividades .

Todo este tipo de materiales se correlacionan con capas geoelectricas que tienen un rango de resistividades que va de 5 a 60  $\Omega$ -m. .

Desde el punto de vista geohidrológico, esta unidad es la que mayor permeabilidad presenta, ya que casi en su totalidad los sedimentos y rocas que lo forman son permeables; a excepción de los conglomerados que se encuentran muy cementados y presentan poca permeabilidad; así también, en otros sedimentos como son las arenas y gravas, que su permeabilidad varía con el porcentaje de arcillas que contengan.

#### UNIDAD $U_1^B$

Esta unidad presenta las mismas características litológicas que la unidad  $U_1^A$ , pertenece a la misma secuencia volcano-sedimentaria .

La unidad  $U_1^B$  se caracteriza por que en esta secuencia tiende a haber una predominancia de riolitas, como se pudo observar en los cortes litológicos de los siguientes pozos representativos, " Ojo de agua de Crucitas # 28", PAB 40 ( sondeo 302 ) y el pozo PAB 42 ( sondeo 13 ) .

Esta unidad se correlacionó con capas geoelectricas que tienen una resitividad variante entre los 61 y 120  $\Omega$ -m. .

Geohidrológicamente esta unidad tiene características semejantes a la unidad  $U^A$ , solo que predominan las riolitas y es menos productiva, ya que aunque las riolitas presentan porosidad secundaria esta unidad no es permeable, debido a que

aunque las fracturas se encuentren saturadas estas no ceden el agua.

#### UNIDAD $U_2$

Esta unidad es la formación más profunda detectada en el estudio geoelectrico, se caracteriza por tener resistividades que varían entre los 80 y 480  $\Omega$ -m. .

La unidad  $U_2$  puede ser identificada como una formación de tipo volcánico, constituida fundamentalmente por riolitas. Estas riolitas se caracterizan por tener poco fracturamiento, lo que hace que esta roca sea más resistiva, esta unidad aparece en los cortes litológicos de los pozos PAB 41 ( al norte del sondeo 211 ), La Union # 2 ( sondeo 204 ) SAA 1 ( sondeo 18 ) y el pozo SAA 11 ( sondeo 112 ) .

Geohidrologicamente esta unidad funciona como basamento de la secuencia volcano-sedimentaria y debido a su baja permeabilidad, es la capa límite del acuífero libre de la zona estudiada .

Desde el punto de vista estructural la información de las secciones geoelectricas permite establecer que el subsuelo de la zona de El Llano fué afectada por un intenso tectonismo, lo que originó un sistema regional de fallas y fracturas, las cuales están asociadas con el origen de la falla Aguas-calientes.

A causa de este tectonismo, el basamento rocoso de alta resistividad se fracturó en bloques y se hundió en diferentes regiones del área de estudio .

Al analizar los diferentes cortes geoelectricos se pudieron definir cuatro diferentes bloques, los cuales se definen a continuación :

## BLOQUE I .

Este bloque se localiza al este de la zona de estudio, sufrió un hundimiento con respecto al Bloque II, así estos dos bloques se encuentran relacionados por medio de una falla normal, que se observa en los siguientes perfiles : A - A' entre los sondeos 15 y 16, B - B' entre los sondeos 107 y 108, F - F' entre los sondeos 20 y 27, y en el perfil E - E' entre los sondeos 403 y 404 .

Tomando en cuenta los pozos de apoyo que se tienen dentro de este bloque, se observó que en la parte central los pozos presentan gastos muy pequeños, esto se debe a que aunque los pozos corten la unidad  $U_1^A$  en esta zona ella se compone principalmente por conglomerados, los cuales presentan resistividades bajas y aun así son casi completamente impermeables . Los pozos localizados en la parte sur del bloque y que se encuentran cercanos a la falla normal presentan gastos que oscilan entre los 32 y 36 l.p.s., este mayor gasto se debe a que cortan un paquete de la unidad  $U_1^A$  más potente y con menor presencia de conglomerados. Los pozos perforados en las zonas donde se encuentran aflorando la unidad Arenisca-conglomerado, presentan gastos pequeños, que dependen del espesor por donde corten esta unidad .

## BLOQUE II

Este bloque se encuentra relacionado con el bloque III por medio de una falla normal, dicha falla se observa en los perfiles B - B' entre los sondeos 114 y 115, C - C' entre 208 y 209, E - E' entre 408 y 409, y el perfil G - G' entre los sondeos 602 y 603 . En la parte norte de este bloque se encuentran un conjunto de pequeñas fallas .

Tomando en cuenta los cortes litológicos de los pozos

PAB 40 ( sondeo 302 ) y PAB 42 ( sondeo 13 ), se sabe que en la parte norte del bloque existe predominancia de riolitas las cuales se encuentran casi aflorando. La riolita en este lugar se encuentra fracturada y alterada, pero a pesar de este fracturamiento los gastos de los pozos perforados en esta zona son casi nulos, esto puede deberse a que las fracturas se encuentran rellenas de materiales arcilloso haciendo poco permeables la formación .

En la parte central de este bloque la riolita va ganando profundidad por lo que el paquete de la unidad  $U_1^A$  se va haciendo más potente, debido a esto los pozos perforados en la parte sur tienen un mayor gasto que en la parte norte, el gasto promedio en esta área es de 15 l.p.s. con un máximo de 29 litros por segundo.

Dentro de este bloque los pozos que tienen un mayor gasto se encuentran en la parte sureste, esto como ya se menciona es debido a que el basculamiento que sufrió este bloque tiene una dirección sur, lo cual hace que el paquete de sedimentos aumente de espesor en esta dirección.

Es recomendable la realización de estudios geofísicos en la parte sur de este bloque, principalmente en la región delimitada entre los poblados de Matamoros, Tepetatillo, Betulias y San José de los Díaz, para determinar si el paquete de la unidad  $U_1^A$  continua haciéndose potente; de pasar esto la zona tendría buenas características geohidrológicas.

### *BLOQUE III .*

Este bloque sufrió un hundimiento respectivamente con los bloques II y IV, con respecto a el bloque IV se encuentra relacionado por medio de una falla normal, como se puede observar en los perfiles geoeléctrico B - B' entre los sondeos

115 y 116, E - E' entre los sondeos 412 y 609, y la sección G - G' entre los sondeos 608 y 609 .

El gran espesor de sedimentos así como el fracturamiento de las riolitas hacen que dentro de esta fosa tectónica se encuentren pozos con gastos que fluctúan entre los 30 y 50 l.p.s. aproximadamente; siendo el de mayor gasto el pozo PAB 36 ( sondeo 606 ) localizado en la parte sur de este graben en donde el paquete de sedimentos de la unidad U<sub>1</sub><sup>A</sup> tiene su mayor potencia .

#### BLOQUE IV

Este bloque sufrió un levantamiento con respecto a el bloque III, y está relacionando con este a través de una falla normal .

Dentro de este bloque se tiene poca información tanto geofísica como geohidrológica . En si con la única información geohidrológica con que se cuenta se tiene en la parte norte del bloque. la cual consiste en los pozos PAB 35 y el pozo Ojo de Agua de Crucitas # 28 , los cuales tienen gastos muy pequeños, este bajo gasto se debe a que el material que cortan estos pozos son materiales principalmente impermeables, como son las riolitas y los conglomerados .

## CONCLUSIONES

Las discordancias y transiciones resistivas, reveladas por los SEV, demuestran que la estructura geológica subterránea de la zona de El Llano, fué notablemente afectada por el intenso tectonismo que originó un sistema regional de fallas y fracturas, asociado con la gran falla Aguascalientes.

En base a los resultados obtenidos por los SEV, realizados en esta zona, se observó una secuencia volcano-sedimentaria, compuesta por tres unidades descritas a continuación :

### UNIDAD $U_1^A$ .

Presenta resistividades entre 5 y 60  $\Omega$ -m. y está formada por la unidad Arenisca-Conglomerado, así como por gravas y arenas, muchas veces empacadas en arcillas, además de tobas y riolitas muy alteradas y fracturadas.

### UNIDAD $U_1^B$ .

Esta unidad presenta las mismas características que la unidad  $U_1^A$ , salvo que en esta predominan riolitas. La resistividad de la unidad varía entre los 61 y 120  $\Omega$ -m.

### UNIDAD $U_2$ .

Se caracteriza por tener resistividades que varían entre los 80 y 680  $\Omega$ -m., se identifica como una formación de tipo volcánico, constituida por riolitas.

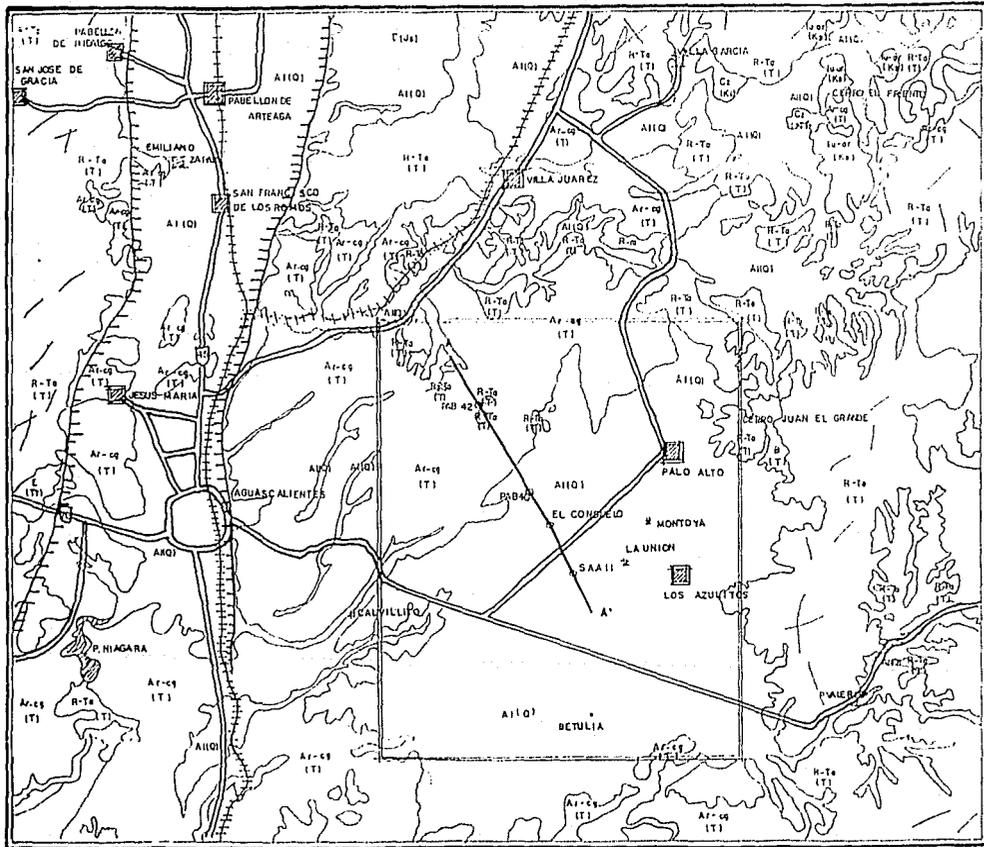
- A causa del intenso tectonismo, el basamento rocoso de alta resistividad se fracturo en bloques y se hundió en diferentes regiones del área en estudio.

- Desde el punto de vista geohidrológico se puede concluir que la unidad  $U_1^A$  funciona como acuífero libre, igual que la unidad  $U_1^B$ ; sólo que la primera es mucho más productiva.

La unidad  $U_2$  debido a su baja permeabilidad, funciona como la roca sello del acuífero libre.

- Los hundimientos localizados en la zona de estudio, son las estructuras geológicas más favorables, desde el punto de vista geohidrológico.

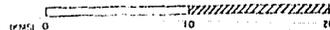
- Se recomienda continuar estudios geofísicos en la parte sur del área de estudio, para efecto de completar el análisis de la zona de El Llano.



## SIMBOLOGIA

|          |  |
|----------|--|
| A11Q     | ALUVION (CUATERNARIO)                          |
| Re1Q     | RESIDUAL (CUATERNARIO)                         |
| Cg1Q     | CONGLOMERADO (CUATERNARIO)                     |
| Af-cg1T  | ARENISCAS - CONGLOMERADO<br>TERCIARIO SUPERIOR |
| Lu-or1T  | LUTITA - ARENISCAS TERCARIO<br>SUPERIOR        |
| Lu-or1Ks | LUTITA - ARENISA (CRETACICO<br>SUPERIOR)       |
| Cv-Lu1Ks | CALIZA - LUTITA (CRETACICO SU<br>PERIOR)       |
| Cv1Ks    | CALIZA (CRETACICO SUPERIOR)                    |
| Cz-Lu1Ks | CALIZA - LUTITA (CRETACICO IN<br>TERIOR)       |
| B1T      | BASALTO (TERCIARIO SUPERIOR)                   |
| R-To1T   | RELITA TUBA ACIDA (TERCIARIO<br>SUPERIOR)      |
| E1Js     | ESQUISTO (JURASICO SUPERIOR)                   |
| E1Tr     | ESQUISTO (TRIASICO)                            |
| ∕        | FALLA  |
| ⊙        | PRESA  |
| ⊠        | POBLACION                                      |
| —        | CARRETERA                                      |
| ∕        | VIA DE TREN                                    |

ESCALA 1:250 000



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**GEOLOGIA REGIONAL**

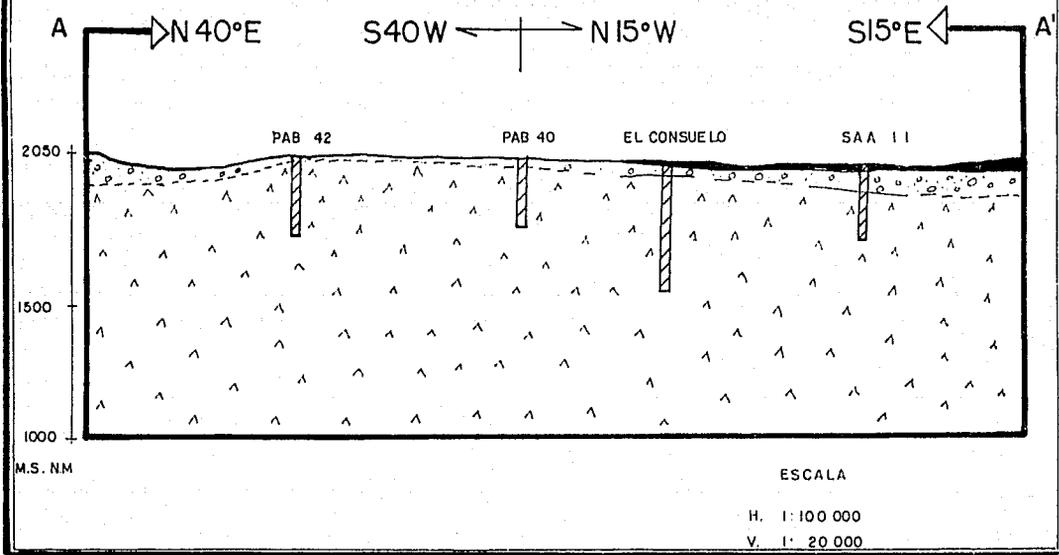
PLANO No 1

102°25'

102°00'

10°45'

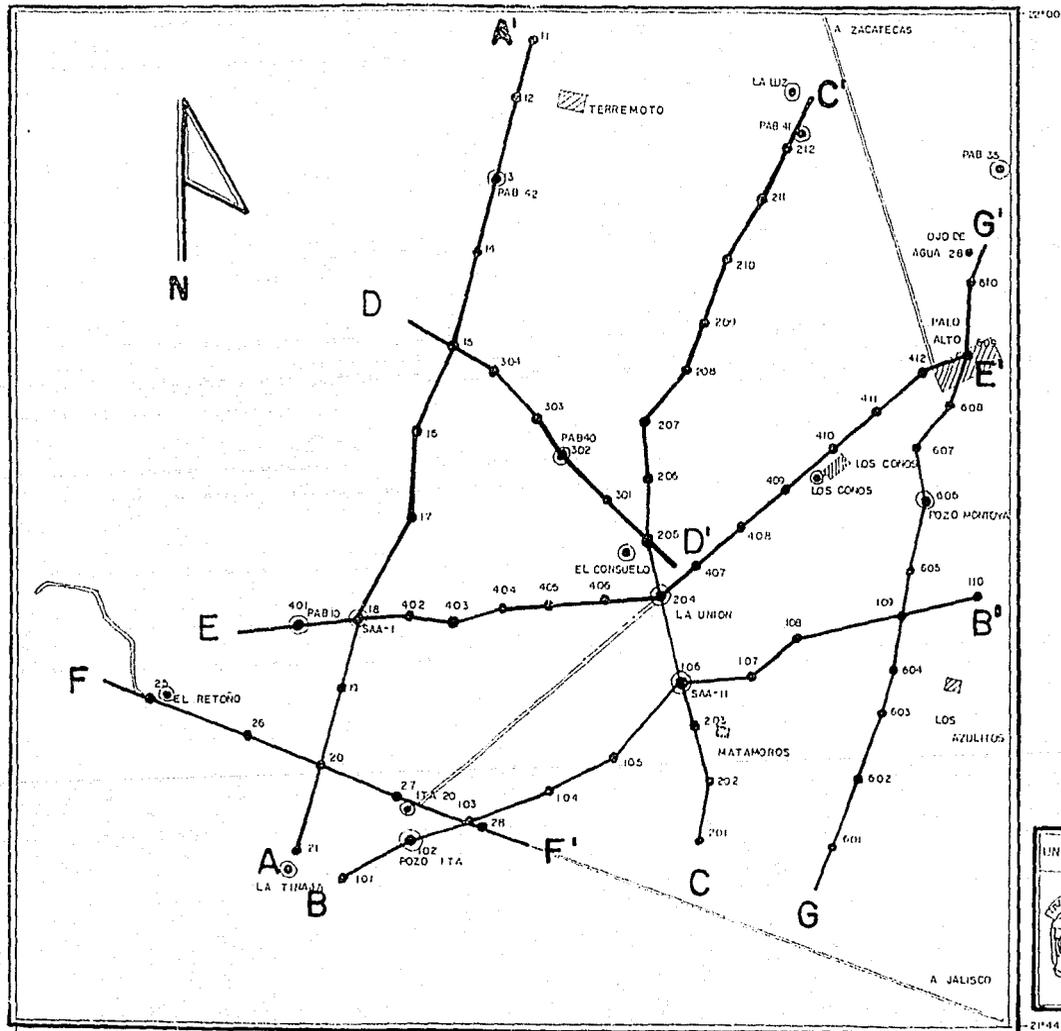
# CORTE GEOLOGICO A - A'



## SIMBOLOGIA

-  ALUVION
-  ARENISCAS - CONGLOMERADO
-  RIOLITA

|   |                        |
|---|------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO   |                        |
|  | FACULTAD DE INGENIERIA |
| CORTE GEOLOGICO A-A'  |                        |



### SIMBOLOGIA

|  |                   |
|--|-------------------|
|  | LINEAS DE SONDEOS |
|  | POZOS             |
|  | POBLACION         |
|  | CARRETERA         |

ESCALA 1:50 000

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO |                                   |
|   | FACULTAD DE INGENIERIA            |
|   | LOCALIZACION DE LINEAS DE SONDEOS |
|   | PLANO No 2                        |

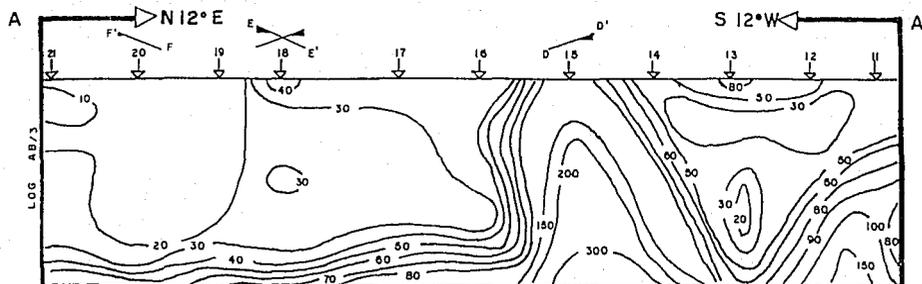
102°10'

101°55'

21°44'

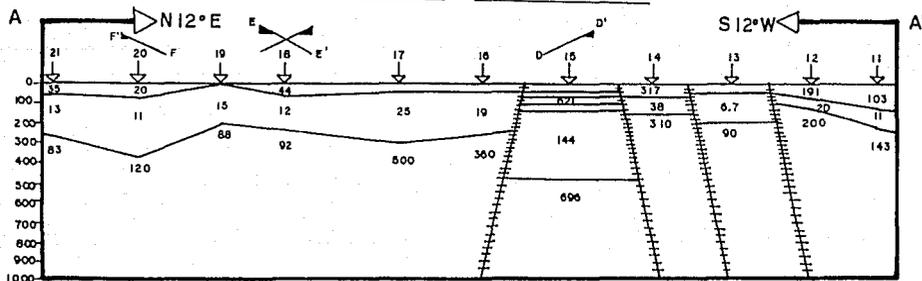
21°00'

## SECCION DE ISORRESISTIVIDADES ELECTRICAS

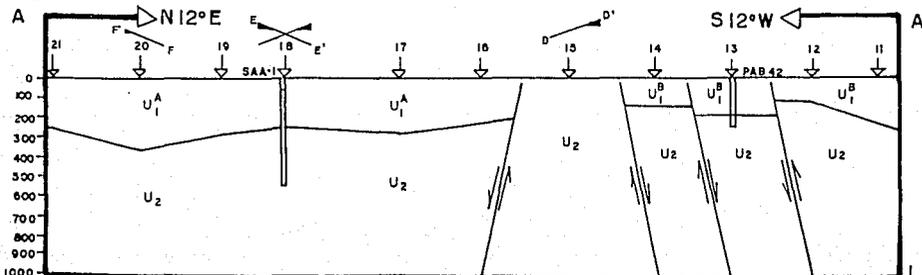


## SIMBOLOGIA

|   |  |
|---|--|
|   | CURVA DE ISORRESISTIVIDAD  |
|   | SONDEO ELECTRICO VERTICAL  |
|   | RUMBO DE LINEA   |
|   | CRUCE DE LINEA   |
|   | TRANSICIONES ELECTRICAS RESISTIVAS   |
|   | CAMBIO DE RUMBO  |
|   | POZO   |
|   | GASTO  |
|   | NIVEL ESTATICO   |
| B <sup>I</sup> />   | TOBAS, RIOLITAS Y EN MENOR CANTIDAD ARENISCAS, CONGLOMERADOS, GRAVAS Y ARENAS. |
| <h2 style="text-align: center;">SECCION GEOELECTRICA</h2> |  |



## SECCION GEOLOGICA INTERPRETADA



ESCALAS H. 1:100 000  
V. 1:20 000

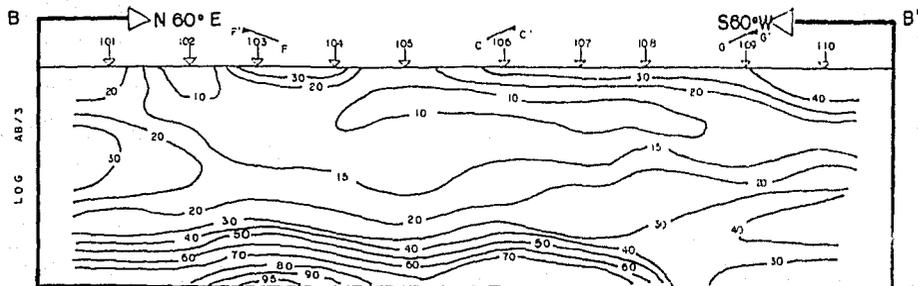
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

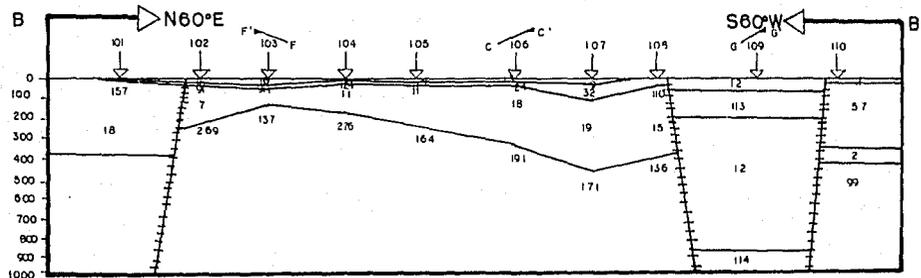
# PLAN No 3

LINEA A-A'

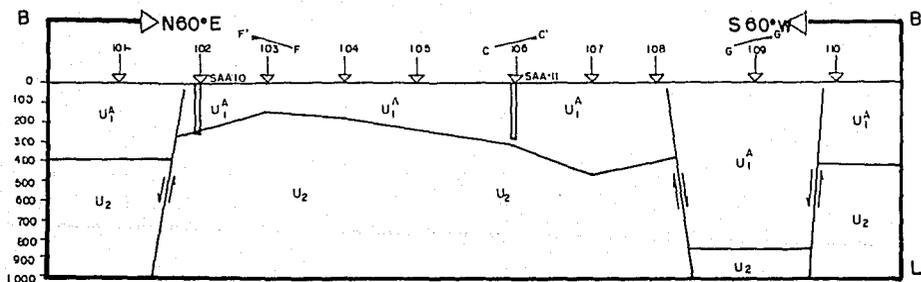
### SECCION DE ISORRESISTIVIDADES ELECTRICAS



### SECCION GEOELECTRICA



### SECCION GEOLOGICA INTERPRETADA



### SIMBOLOGIA

|             |  |
|-------------|--|
|             | CURVA DE ISORRESISTIVIDAD  |
|             | SONDEO ELECTRICO VERTICAL  |
|             | RUMBO DE LINEA   |
|             | CRUCE DE LINEA   |
|             | TRANSICIONES ELECTRICAS RESISTIVAS   |
|             | CAMBO DE RUMBO   |
|             | POZO   |
|             | GASTO  |
| <b>N. E</b> | NIVEL ESTATICO   |
| $U_1^A$     | FORMADA POR INTERCALACIONES DE ARENISCAS Y CONGLOMERADOS EN ALGUNOS CASOS RIOLITAS FRACTURADAS |
| $U_1^B$     | TOBAS, RIOLITAS Y EN MENOR CANTIDAD ARENISCAS, CONGLOMERADOS, GRAVAS Y ARENAS                  |
| $U_2$       | RIOLITA MASIVA Y EN ALGUNOS CASOS POCO FRACTURADA  |

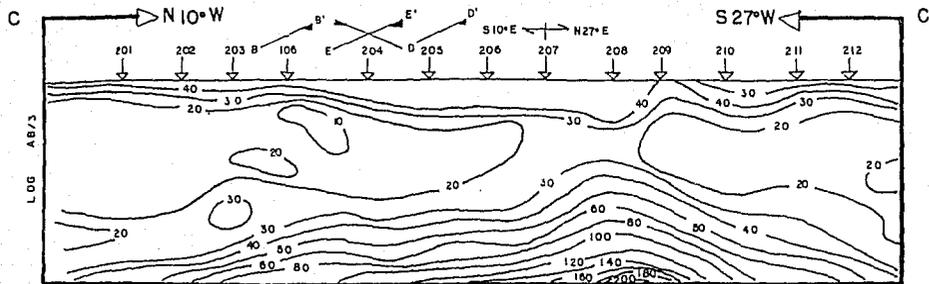
ESCALAS  
H. 1' 100 000  
V. 1' 20 000



## PLANO No 4

LINEA B-B'

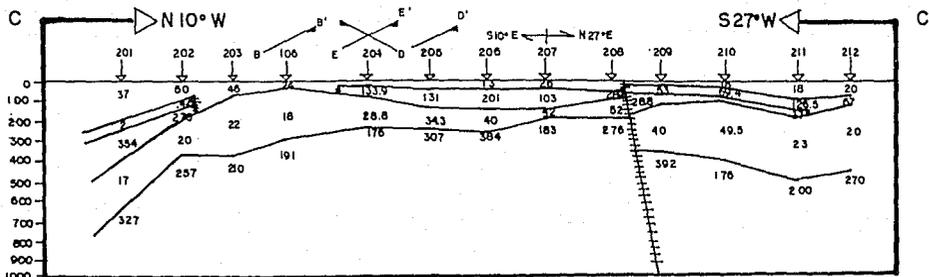
### SECCION DE ISORRESISTIVIDADES ELECTRICAS



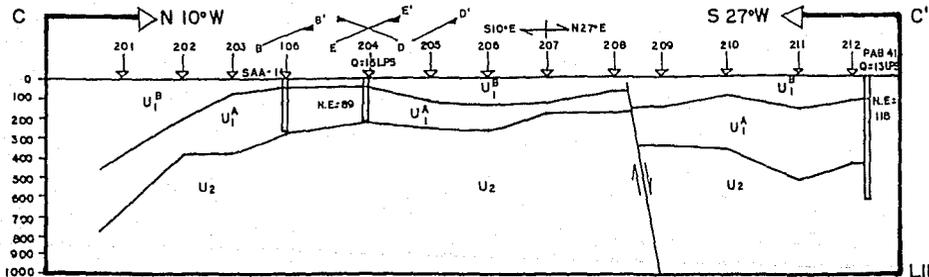
### SIMBOLOGIA

|  |   |
|--|---|
|  | CURVA DE ISORRESISTIVIDAD   |
|  | SONDEO ELECTRICO VERTICAL   |
|  | RUMBO DE LINEA  |
|  | CRUCE DE LINEA  |
|  | TRANSICIONES ELECTRICAS RESISTIVAS  |
|  | CAMBIO DE RUMBO   |
|  | POZO  |
|  | GASTO   |
|  | NIVEL ESTATICO  |
|  | FORMADA POR INTERCALACIONES DE ARENAS Y CONGLOMERADOS EN ALGUNOS CASOS RIOLITAS FRACTURADAS |
|  | TOBAS, RIOLITAS Y EN MENOR CANTIDAD ARENAS  |
|  | RIOLITA MASIVA Y EN ALGUNOS CASOS POCO FRACTURADA   |

### SECCION GEOELECTRICA



### SECCION GEOLOGICA INTERPRETADA



H. 1:100 000  
ESCALAS V. 1: 20 000

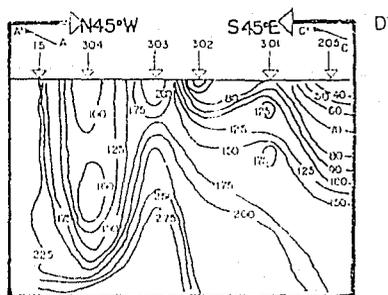
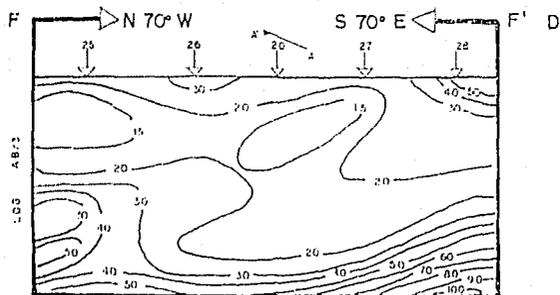
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**PLANO No 5**

LINEA C-C'

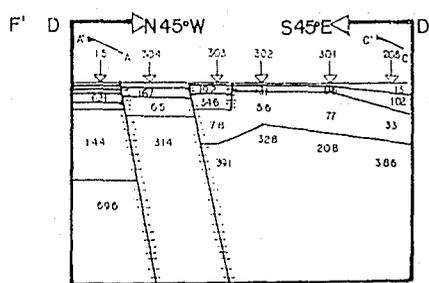
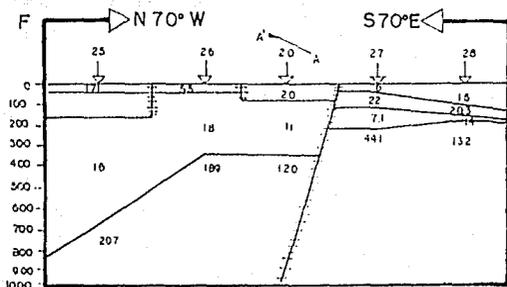
# SECCION DE ISORRESISTIVIDADES ELECTRICAS



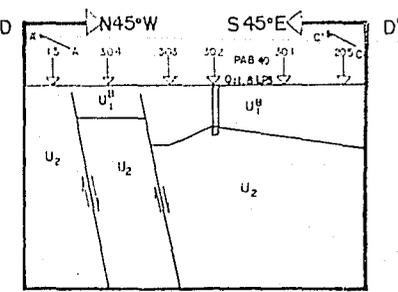
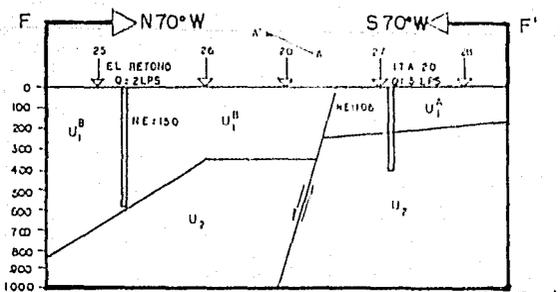
## SIMBOLOGIA

|  |  |
|--|--|
|  | CURVA DE ISORRESISTIVIDAD  |
|  | SONDEO ELECTRICO VERTICAL  |
|  | RUMBO DE LINEA   |
|  | CRUCE DE LINEA   |
|  | TRANSICIONES ELECTRICAS RESISTIVAS   |
|  | CAMBIO DE RUMBO  |
|  | POZO   |
|  | GASTO  |
|  | HIVEL ESTADICO   |
|  | FORMADA POR INTERCALACIONES DE ARENISCAS Y CONGLOMERADOS EN ALGUNOS CASOS RIOLITAS FRACTURADAS |
|  | TOBAS, RIOLITAS Y EN MENOR CANTIDAD ARENISCAS Y CONGLOMERADOS, GRAVAS Y ARENAS                 |
|  | RIOLITA MASIVA Y EN ALGUNOS CASOS TOCO FRACTURADA  |

## SECCION GEOELECTRICA



## SECCION GEOLOGICA INTERPRETADA



LINEA F-F'

LINEA D-D'

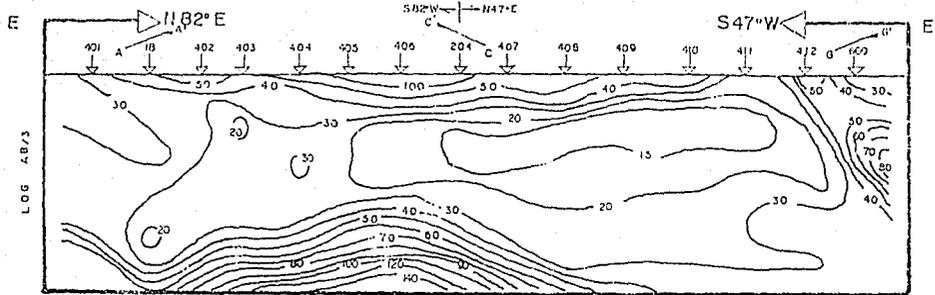
H. 1:100 000  
Escala v. 1: 20 000

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

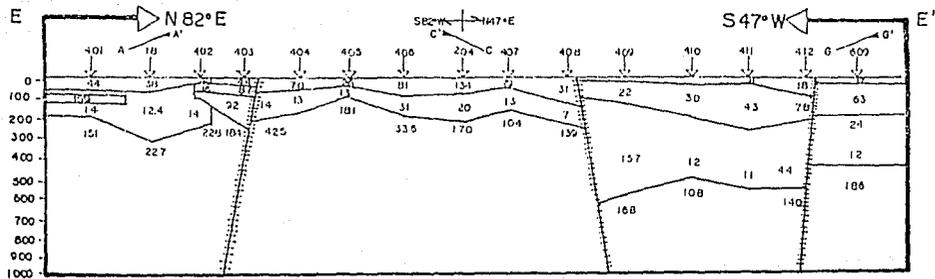
FACULTAD DE INGENIERIA

**PLANO No6**

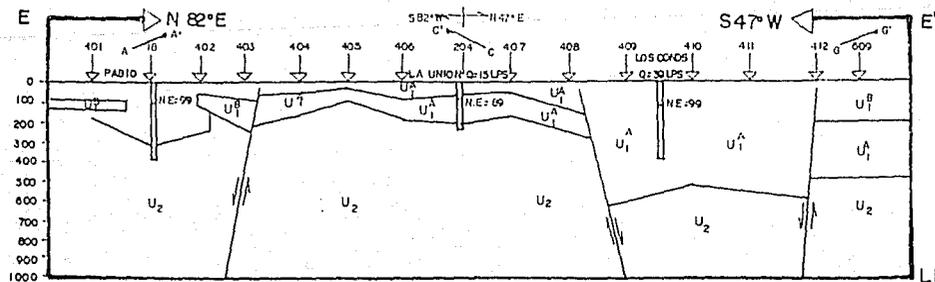
### SECCION DE ISORRESISTIVIDADES ELECTRICAS



### SECCION GEOELECTRICA



### SECCION GEOLOGICA INTERPRETADA



### SIMBOLOGIA

|  |  |
|--|--|
|  | CURVA DE ISORRESISTIVIDAD  |
|  | SONDEO ELECTRICO VERTICAL  |
|  | RUMBO DE LINEA   |
|  | CRUCE DE LINEA   |
|  | TRANSICIONES ELECTRICAS RESISTIVAS   |
|  | CAMBIO DE RUMBO  |
|  | POZO   |
|  | GASTO  |
|  | NIVEL ESTATICO   |
|  | FORMADA POR INTERCALACIONES DE ARENISCAS Y CONGLOMERADOS EN ALGUNOS CASOS RIOLITAS FRACTURADAS |
|  | TOBAS, RIOLITAS Y EN MENOR CANTIDAD ARENISCAS, CONGLOMERADOS, GRAVAS Y ARENAS                  |
|  | RIOLITA MASA Y EN ALGUNOS CASOS POCO FRACTURADA  |

ESCALAS H. 1:100 000  
V. 1:20 000

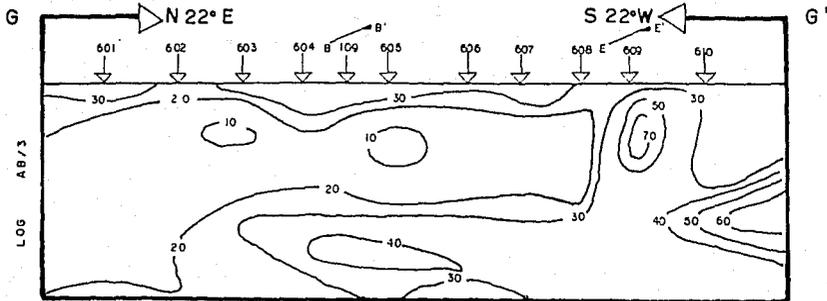
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

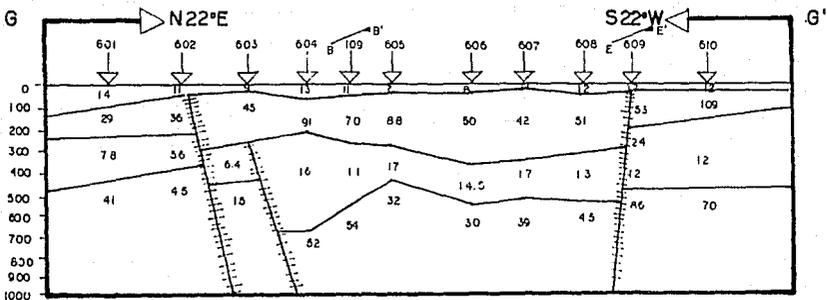
**PLANO No 7**

LINEA E-E'

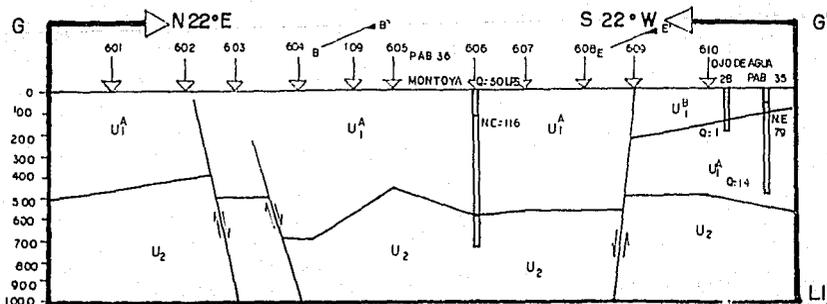
SECCION DE ISORRESISTIVIDADES ELECTRICAS



SECCION GEOELECTRICA



SECCION GEOLOGICA INTERPRETADA



LINEA G-G'

SIMBOLOGIA

|  |  |
|--|--|
|  | CURVA DE ISORRESISTIVIDAD  |
|  | SONDEO ELECTRICO VERTICAL  |
|  | RUMBO DE LINEA   |
|  | CRUCE DE LINEA   |
|  | TRANSICIONES ELECTRICAS RESISTIVAS   |
|  | CAMBIO DE RUMBO  |
|  | POZO   |
|  | GASTO  |
|  | NIVEL ESTATICO   |
|  | FORMADA POR INTERCALACIONES DE ARENASCAS Y CONGLOMERADOS EN ALGUNOS CASOS RIOLITAS FRACTURADAS |
|  | TOBAS, RIOLITAS Y EN MENOR CANTIDAD ARENASCAS, CONGLOMERADOS, GRAVAS Y ARENAS                  |
|  | RIOLITA MASIVA Y EN ALGUNOS CASOS POCO FRACTURADA  |

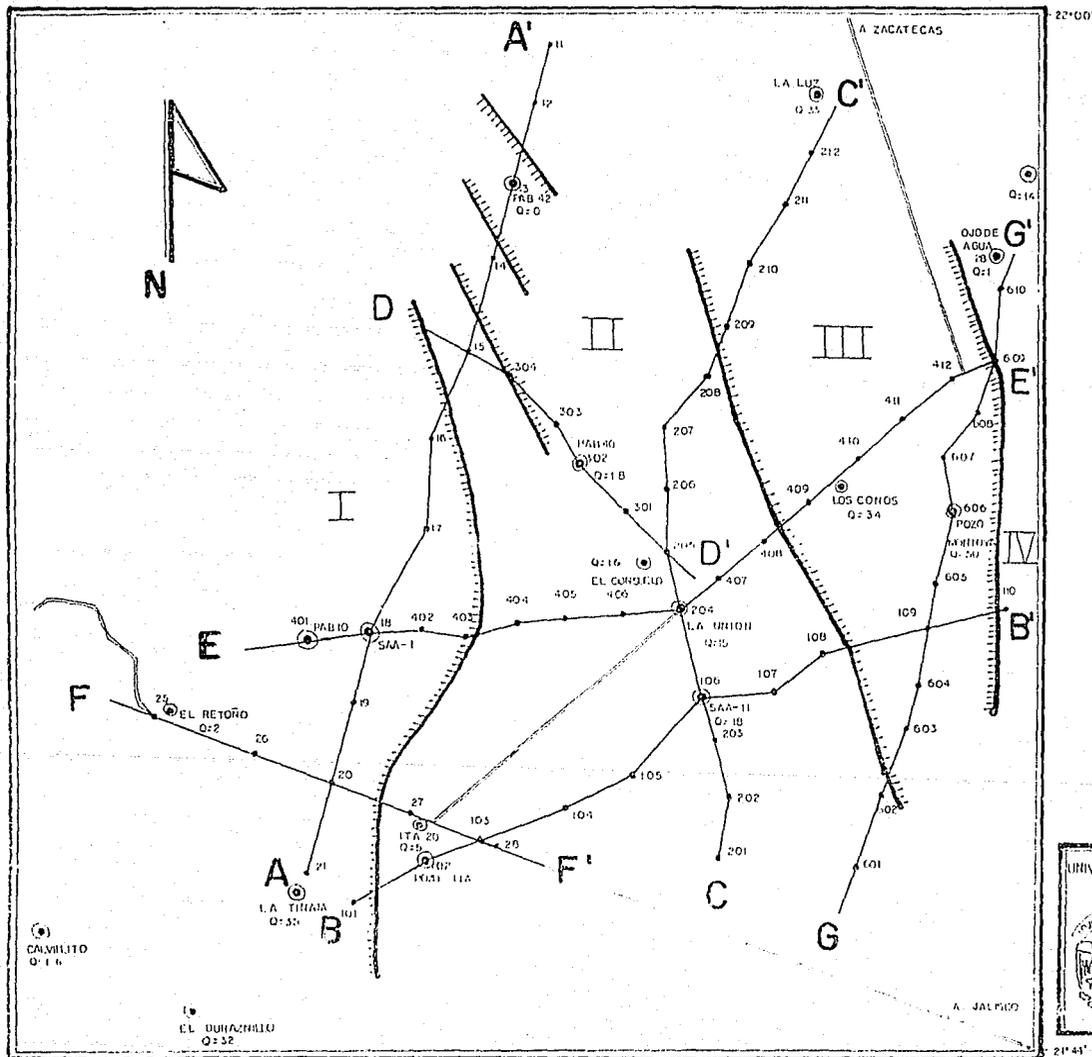
H. 1:100 000  
 ESCALAS V. 1:20 000

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA

PLANO No 8



22°00'

SIMBOLOGIA



FALLAS



POZOS



CARRETERAS

ESCALA 1:50 000

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

LOCALIZACIÓN DE BLOQUES

PLANO No 9

21°45'

102°10'

101°55'

## BIBLIOGRAFIA

- SINTESIS GEOGRAFICA DE AGUASCALIENTES (1981). SECRETARIA DE PROGRAMACION Y PRESUPUESTO, COORDINACION GENERAL DE LOS SERVICIOS NACIONALES DE ESTADISTICA, GEOGRAFIA E INFORMATICA.

- SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS . ESTUDIOS GEOFISICOS EN DIVERSAS ZONAS DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES . INVESTIGACIONES TECNICAS DEL SUBSUELO, S.A.

- KOEFOED, O., (1979b). GEOSOUNDING PRINCIPLES I. ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY.

- ORELLANA, E. Y MOONEY, H.M., (1966). MASTER TABLAS AND CURVES FOR VERTICAL ELECTRICAL SOUNDINGS OVERS LAYERED STRUCTURES. INERCIENCIA, MADRID.

- ORELLANA, E., (1972). PROSPECCION GEOELECTRICA EN CORRIENTE CONTINUA. PARANINFO MADRID.

- GONZALEZ V., P., (1983). INTERPRETACION AUTOMATICA DE SONDEOS ELECTRICOS, TESIS DE LICENCIATURA, FACULTAD DE INGENIERIA , U.N.A.M.

- TEJERO, A., A., LEON S., R. Y GONZALEZ V., P., (1984), INTERPRETACION ITERATIVA DE SONDEOS ELECTRICOS. SEGUNDA REUNION GEOHIDROLOGICA, ACADEMIA MEXICANA DE INGENIERIA . INSTITUTO DE INGENIERIA Y MINERIA, UASLP. FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

- FUENTES, L., J., (1985), ESTUDIO GEOELECTRICO DE LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES, AGS., TESIS DE LICENCIATURA, FACULTAD DE INGENIERIA, U.N.A.M.

- SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS. DIRECCION GENERAL DE ADMINISTRACION Y CONTROL DE SISTEMAS HIDROLOGICOS (1987), SINOPSIS GEOHIDROLOGICA DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES.