



**CONSULTORES Y CONTRATISTAS  
DE  
GEOLOGIA Y GEOFISICA**

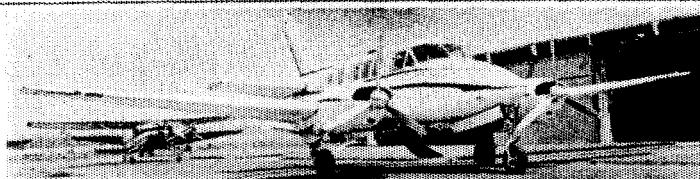
*Compañía Mexicana de Exploraciones, S. A.*

RIO BALSAS 101 8º PISO APDO. POSTAL 5-255

MEXICO 5, D. F.

TELS. 533-62-46

# COMPAÑIA MEXICANA AEROFOTO. S. A.



## ESPECIALIDADES

**Catálogos:**  
 Contraste urbano y rural.  
 Cálculo electrónico.  
 Diseños fotogramétricos electrónicos de obras de ingeniería.  
 Estudios preliminares.  
 Fotointerpretación.  
 Fotografía aérea panorámica.  
 Infraerojo y a color.  
 Fotografía comercial aérea.  
 Fotogrametría.  
 Levantamientos fotogramétricos.  
 Localización de obras.  
 Maquetas fotográficas.  
 Proyección electrónica.  
 Topografía.

132 empleados especializados.

## EQUIPO

1 Avión Queen Air A-40 Mat. XB-XAK	4 Círculos de Reproducción
1 Avión Beyer Rocket, Mat. XB-SAK	3 Unidades de Telémetro MRA-3
1 Avión Beech Craft Mat. XB-VIO	4 Teodolitos Wild T-2
2 Aviones Piper Aztec Mat. XB-MCI y RDO	2 Niveladoras Wild HAK-2
1 Avión Cessna 185 Mat. XB-TIE	4 Compasas doble trópico
Gabinet Control de Procesos IBM, 1131	2 Autogiros Wild A-7 con Reproductora de sonido
Lectora-películadora de imágenes IBM, 1442	2 Extremo compás Wild A-8
Unidad Impresora, IBM, 1135	1 Autogiro Wild A-9
1 Cámara Fotogramétrica Zeiss MRR-A	4 Autogiros Wild B-8
1 Cámara Fotogramétrica Wild RC-5	1 Biplan 760, de 2 proyectores
1 Cámara Fotogramétrica Wild RC-8	2 Kestrel K-3 de 4 proyectores c.c.
1 Cámara Fotogramétrica Wild RC-5	2 Kestrel K-1 de 2 proyectores c.c.
3 Círculos Fisibild	2 Multiplex de 8 proyectores c.c.
4 Círculos para fotografías móviles	
8 Círculos Recifidores	

DIRECCIÓN  
 31 de Agosto #5 338 esquina con Piedad Col. Escandón  
 Teléfono 816-07-40  
 Oficina: AEROFOTO, MEXICO MEXICO 16, D.F.  
 Servicios Aerofoto Jefe Soporte Durango Núm. 218

Schlumberger

# SCHLUMBERGER SURENCO, S. A.

AGENCIA EN MEXICO

Bahía de San Hipólito 56 - Desp. 302

Tel. 250-62-11

MEXICO 17, D.F.

GEOFISICOS CONSULTORES PARA  
PETROLEOS MEXICANOS



*Seismograph Service Corporation  
of Mexico*

RIO TIBER 50-101 MEXICO 5, D.F.  
TELEFONOS : 514-47-94 514-47-96

SUBSIDIARIA DE  
SEISMOGRAPH SERVICE CORPORATION  
6200 East 41st. St. • Box 1590 • Tulsa, Oklahoma, U.S.A.

ESPECIALIZADOS EN :

**SERVICIO DE  
GEOFISICA**

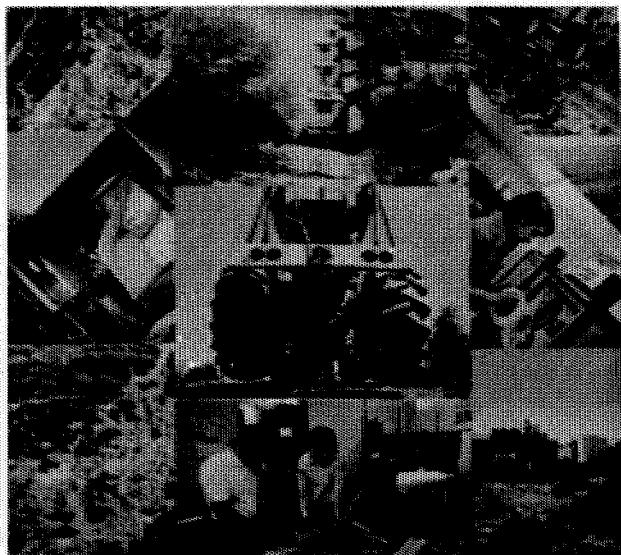
- Levantamientos :
- Sismológicos
  - Gravimétricos
  - Magnetométricos
  - Procesado de Datos Magnéticos
  - LORAC - Levantamiento Electrónico

**SERVICIO DE  
REGISTRO DE POZOS**

- Registros para Evaluación de Formaciones
- Registros de Pozos de Producción
- Servicio de Terminación Permanente
- Registro Continuo de Velocidad



EMPRESA 100% MEXICANA  
AL SERVICIO DE LA INDUSTRIA  
PETROLERA



BRUSELAS 10-3<sup>er</sup> PISO  
COL. JUAREZ  
MEXICO 6, D.F.

566 41 44  
TELS. 566 43 90  
566 42 37

# **BOLETIN**

**de la**

## **Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración**

---

### **S U M A R I O**

**Sondeos Eléctricos Verticales en la  
Porción Norte del Valle de Mexicali  
y Campo Geotérmico de Cerro Prieto,  
Baja California Norte, República Me-  
xicana.**

**Por: Ings. José Carlos Romero González y José Francisco Arellano.**

ASOCIACION MEXICANA DE GEOFISICOS DE EXPLORACION

MESA DIRECTIVA PARA EL PERIODO 1977-1979

Presidente	Ing. Antonio Deza Suárez
Vicepresidente	Ing. Alberto Arroyo Pichardo
Secretario	M.C. Héctor Palafox Rayón
Tesorero	Ing. Mario Rosello Guzmán
Editor	M.C. Rogelio Aspiroz Aguilar
Vocal Poza Rica, Ver.	Ing. Sergio Figueroa Arias
Vocal Coatzacoalcos, Ver.	M.C. José Ponce de León
Vocal Reynosa, Tam.	Ing. Armando Núñez Núñez
Vocal Tampico, Tam.	Ing. Carlos López Ramírez
Vocal Córdoba, Ver.	Ing. Serafín Ortega Aguilar
Vocal Instituto Mexicano del Petróleo	Ing. Rodolfo Marines Campos
Vocal Instituto Politécnico Nacional	Ing. Jorge Franco Páez
Vocal Universidad Nacional de México	M.C. Luis del Castillo

Presidente saliente: Ing. Raúl Silva Acosta

---

Este boletín no se hace responsable de las ideas emitidas en los artículos que se publiquen, sino sus respectivos autores.

---

Este boletín se publica cada tres meses y se distribuye gratuitamente a los socios.

---

Cuota anual para miembros	\$ 300.00
Suscripción anual (no socios)	\$ 350.00
Números sueltos	\$ 120.00

---

Para todo asunto relacionado con el boletín: manuscritos, asuntos editoriales, suscripciones, descuentos especiales a bibliotecas públicas o Universidades, publicaciones, anuncios, etc., dirigirse a:

M.C. ROGELIO ASPIROZ AGUILAR  
Apdo. Postal 53-077  
México 17, D.F.

## RESUMEN

El Gobierno Mexicano, consciente de las necesidades futuras para dotar de fluido eléctrico a diversas zonas de la República Mexicana, y realista de que los yacimientos de energéticos no renovables serán agotados al futuro, ha dado un fuerte impulso a la investigación, con el fin de aprovechar los energéticos renovables, uno de ellos, la energía geotérmica, para la generación de energía eléctrica, tan escasa en la porción Noroeste de nuestro País, donde la naturaleza difícilmente permite la construcción de hidroeléctricas.

La energía geotérmica en el Valle de Mexicali en Baja California - Norte está siendo aprovechada en la planta geotermoeléctrica de Cerro Prieto, la cual tiene una capacidad de 150 MW.

La Comisión Federal de Electricidad, en un intento de definir los límites del actual campo de Cerro Prieto, y conocer las posibilidades geotérmicas del Valle de Mexicali, inició en Julio de 1977 una campaña de estudios geofísicos, entre ellos la exploración geoeléctrica por medio de sondeos eléctricos verticales (SEV), en la cual se ejecutaron alrededor de 200 SEV, tipo Schlumberger, con espacioamiento máximo entre electrodos corriente de 10,000 m; con los cuales se detectaron dos zonas anómalas de baja resistividad que podrían reflejar la existencia de termalidad y profundidad.

## INTRODUCCION

El aumento del costo de los combustibles fósiles en los últimos años ha provocado que se dediquen mayores esfuerzos a utilizar fuentes alternas de energía. Una de ellas es el aprovechamiento del vapor endógeno para la generación de energía eléctrica, como es el caso de la Planta Geotérmica de Cerro Prieto, B.C., en la porción noroeste del país, donde la naturaleza no permite la explotación del petróleo ni la construcción de hidroeléctricas.

Baja California Norte ha sido dotada por la naturaleza con la existencia de recursos geotérmicos, que están siendo aprovechados con la explotación de los acuíferos sobre calentados en el subsuelo en la primera planta geotermoeléctrica del país, la cual tiene una capacidad de producción de 150 M.W.

Este importante energético coadyuva a la industria petrolera, - ya que una planta geotermoeléctrica no necesita de combustibles fósiles, además, proporciona un ahorro de combustible del orden de 2 millones de barriles anuales, para una planta de la capacidad señalada.

La existencia de la planta geotermoeléctrica tiene su base en -

los estudios que se iniciaron en el año de 1959 y que continuaron aún después de la instalación de las dos primeras unidades de 37.5 MW, en 1974.

Mediante diversas tecnologías de geofísica, geología, geoquímica, perforaciones y otras, la zona geotérmica de Cerro Prieto - ha sido explorada por innumerables investigadores del país y de diversas partes del mundo, para tratar de conocer la forma, dimensiones y características del yacimiento geotérmico.

La Comisión Federal de Electricidad, mediante la Brigada de Estudios del Eje Neovolcánico, inició a mediados del año de 1977 la exploración regional de la porción norte del Valle de Mexicali y campo geotérmico de Cerro Prieto, con el objeto de tratar de delimitar el yacimiento, tanto a profundidad como lateralmente y localizar otras zonas con posibilidades geotérmicas. Para ello, se utilizó, entre otros, el método eléctrico de resistividad, ejecutando 188 sondeos eléctricos verticales (SEV) mediante el dispositivo tetraelectródico Schlumberger, con espaciamiento de electrodos de corriente de 20 m a 10,000 m.

La localización de dos anomalías de baja resistividad que podrían tener alguna relación con la actividad geotérmica, una en el -- área del actual campo de explotación y otra 15 km al SE del mismo, fué el resultado más sobresaliente del estudio eléctrico de resistividad.

### UTILIZACION DE LA ENERGIA GEOTERMICA

Los hidrocarburos utilizados en la generación de la electricidad representan una carga demasiado costosa para el desarrollo de un país, sobre todo si se toma en cuenta que dispone de -- otros recursos energéticos con los cuales es posible diversificar el suministro de energía eléctrica. Por tal motivo el riesgo asociado a la búsqueda de nuevas fuentes de energía y costo del desarrollo de la tecnología para aprovecharla, se vuelven más aceptables y justifican los costos que generen estos esfuerzos dentro de un marco estratégico de diversificación de energéticos primarios.

Los programas de exploración y explotación futuras de la CFE,-- preveen aumentar la capacidad del campo de Cerro Prieto de 150 a 400 MW para 1982, así como el desarrollo de nuevos campos, ya que las características geológicas de México parecen señalar a la energía geotérmica como una fuente alternativa de energía.

La generación de energía eléctrica no representa el único uso de la energía geotérmica. Diversos países han sido dotados -- con esta forma de energía, la cual se utiliza en la agricultura, industria y calefacción doméstica; los países que explotan en esta forma dicho recurso son: Japón, Hungría, Islandia, Nue

va Zelandia, URSS, USA e Italia.

Otro rendimiento que proporciona la geotérmica es la extracción de los subproductos químicos que vienen entre los fluidos termales. Un ejemplo de ésto es el campo geotérmico de Landerello, Italia, que aprovecha compuestos químicos como el borato sódico y el carbono de boro para la industria papelera y cerámica.

En el campo de Cerro Prieto es posible el aprovechamiento de subproductos del fluido geotérmico y para ello se están llevando a cabo estudios técnico-económicos. Uno de esos subproductos es - el cloruro de potasio, ya que México actualmente importa potasio y según cálculos preliminares, su costo es de 150 millones de pesos anuales. Con el potasio del campo de Cerro Prieto y el que pudiera obtenerse de otros campos, podrían cubrirse las necesidades nacionales. Así también se puede citar el caso del litio--- que en el ámbito mundial se cotiza a precios altos.

De acuerdo con lo anterior, los subproductos que proporciona la explotación geotérmica representan un renglón importante y deben tomarse en consideración, ya que incluso la sola explotación de ellos costearía la instalación de una planta extractora de minerales.

Algunas teorías acerca del comportamiento interno de la corteza

terrestre, se han basado en mediciones geofísicas que han permitido desarrollar hipótesis concernientes a su conformación. Las fuentes generadoras de calor que se mencionan en diferentes teorías son las relacionadas con el decaimiento de los materiales radioactivos, presión mecánica, empuje por mareas, reacciones--químicas y fricción. Sin embargo, la teoría más aceptada como fuente de calor para zonas geotérmicas, es aquella que las vincula con la tectónica de placas y/o vulcanismo reciente, en la que el fracturamiento de la corteza terrestre facilita el ascenso - de magmas hacia la superficie, con lo cual se permite el calentamiento de formaciones someras.

El término geotermia se refiere en sentido amplio al calor natural existente en el interior de la tierra, independientemente - de los factores que intervienen en sus manifestaciones superficiales. Este calor fluye por conducción directa a través de las rocas o bien es transportado por fluidos que ascienden por las fracturas hasta zonas someras para constituir los yacimientos - geotérmicos. El conjunto fuente de calor, fluido y zona cortical donde se almacena o circula el fluido, constituye el sistema geotérmico.

La variación de la temperatura con la profundidad es conocida - como el gradiente geotérmico. Una anomalía geotérmica existe -

donde quiera que el aumento de temperatura por metro de profundidad es mayor que el normal. El aumento normal en el gradiente geotérmico es de 2.5 a 3°C por 100 m.

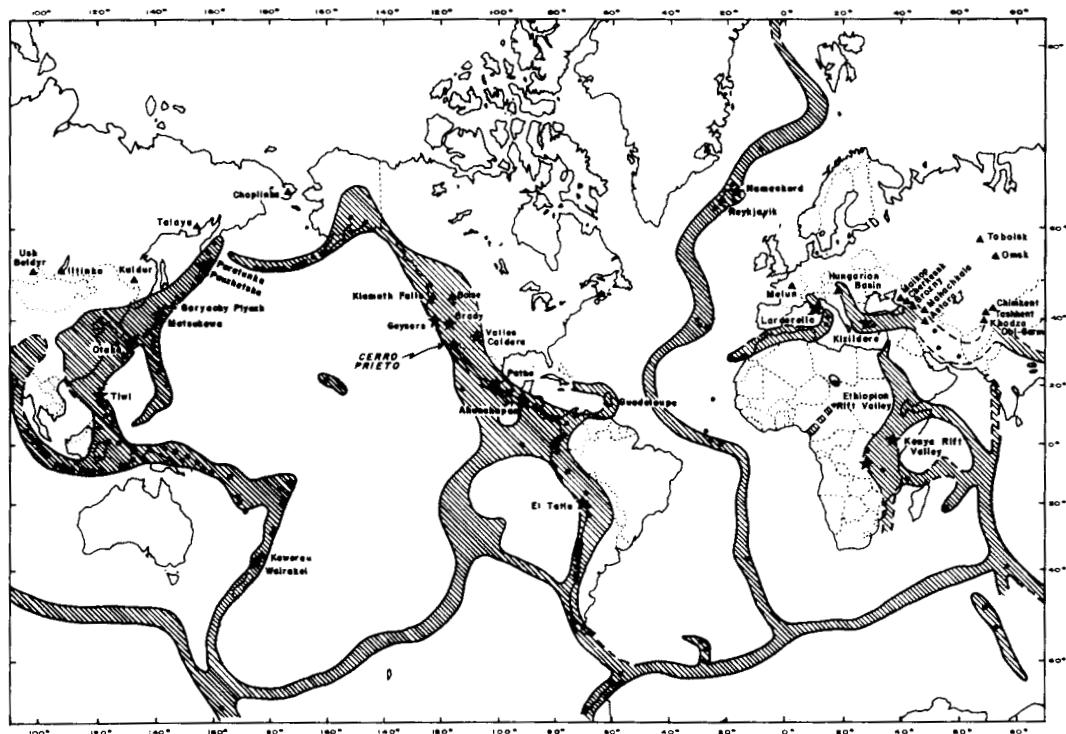
Tomando en cuenta lo anterior, el estudio de recursos geotérmicos para propósitos de utilización, debe ser entendido en términos de anomalías geotérmicas.

La tectónica de placas, relacionada con las corrientes de convección en el manto terrestre, junto con la actividad volcánica y la circulación termal dentro de la corteza, constituyen el mecanismo para formar depósitos hidrotermales próximos a la superficie. Tales regiones de alto flujo térmico comúnmente son zonas de vulcanismo joven y se localizan a lo largo de las principales placas de la corteza terrestre (Figura 1).

En los lugares de la superficie donde se manifiestan las celdas de convección, éstas provocan debilidades en la corteza por las cuales el magma alcanza la superficie y logra salir en forma de productos piroclásticos y lavas. En su ascenso y en el caso de no llegar hasta la superficie proporcionan la fuente de calor - de un yacimiento geotérmico.

El objeto de la exploración geotérmica es encontrar un yacimiento que posea temperaturas y permeabilidades lo suficientemente

## REGIONES GEOTERMICAS DEL MUNDO



## EXPLICACION

- Volcanes activos en tiempos históricos
- ★ Plantas geotermoelectricas en operación.
- ▲ Plantas de calor geotérmicas en producción.
- REGIONES GEOTERMICAS.

Tomado de Wahl.

Figura 1

grandes para almacenar suficientes cantidades de calor y fluidos que justifiquen su explotación económica. Para que la obtención del fluido geotérmico sea rentable, éste se debe de encontrar en rocas permeables y a profundidades someras (menos de 3 de km) -- con temperaturas mayores de 100°C a más de 300°C.

Los trabajos exploratorios con fines geotérmicos deben dirigirse a la determinación de las cuatro características principales de un yacimiento. Es decir, la fuente de calor que suministra la energía; las zonas con permeabilidad para la existencia de un acuífero; la presencia de una roca sello como frontera impermeable en la parte superior del yacimiento y el suministro de agua subterránea que proporcione la recarga del acuífero.

#### PROSPECCION GEOELECTRICA. CONCEPTOS TEORICOS FUNDAMENTALES

Las propiedades electromagnéticas de las rocas se expresan fundamentalmente por medio de las siguientes magnitudes físicas; la resistividad eléctrica ( $\rho$ ) o su inversa la conductividad ( $\tau$ ), - la constante dieléctrica ( $\epsilon$ ), la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) - y la actividad electroquímica. La variación de dichas propiedades en las rocas depende del modo de como están distribuidos sus minerales y de la forma, volumen y relleno (generalmente agua o aire) de los poros; además de los efectos que sobre ellas ejer--

cen la salinidad, temperatura y presión.

Resistividad.- La base fundamental del comportamiento eléctrico de los materiales se basa en la Ley de Ohm. Esta ley establece la relación de la corriente  $I$  que pasa por un cuerpo y que provoca una caída de potencial  $V$  debido a la resistencia  $R$  que opone al paso de ella. Matemáticamente se expresa por medio de la relación:

$$V = I/R \quad (1)$$

Se sabe que si una corriente eléctrica uniforme fluye a través - de un cilindro homogéneo en dirección de su eje, la resistencia será proporcional a la longitud  $L$  e inversamente proporcional a su área  $A$ , por lo que la resistencia de dicho elemento está dada como:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

Donde  $\rho$  es una constante de proporcionalidad numéricamente igual a la resistencia entre las caras de un cubo unitario de un material homogéneo e isotropo.  $\rho$  es llamada resistividad o resistencia específica del material. En el sistema MKS sus unidades son el ohm-m.

Si se llevan estos conceptos a pequeños volúmenes y en vez de la corriente que fluye a través del medio finito se considera la --

densidad de corriente  $\bar{J}$ , y en lugar de la diferencia de potencial se emplea el gradiente de potencial Eléctrico  $E$ , entonces para un elemento rectangular de dimensiones  $dx$ ,  $dy$  y  $dz$ , situado en un punto  $P$  y orientado de modo que el eje  $Z$  esté en la dirección al vector de densidad de corriente  $\bar{J}$  en  $P$  (Figura 2) y si no existen discontinuidades en dicho campo en las vecindades de  $P$ , la resistencia a través del paralelepípedo puede escribirse como:

$$R = \frac{\bar{E} \cdot dz}{\bar{J} \cdot dx \cdot dy} \quad (3)$$

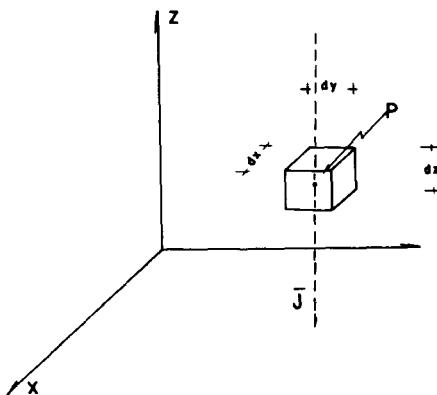


Figura 2

Por otro lado, puesto que (2) para un cuerpo infinitesimal es:

$$R = \rho \frac{dz}{dxdy} \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en (3) resulta que

$$\rho = \frac{\bar{E}}{\bar{J}} \quad (5)$$

Esta expresión es conocida como Ley de Ohm en su forma vectorial diferencial.

Conductividad.- La facilidad con que circula la corriente eléctrica en un determinado material se denomina conductividad  $\tau$ ; por lo tanto, resulta ser la inversa de la resistividad  $\rho$  y se expresa con la ecuación:

$$\tau = \frac{1}{\rho} \quad (6)$$

De acuerdo como se presenta en la naturaleza, la conductividad - se ha definido en dos formas:

Conductividad electrónica.- Se le denomina también conductividad eléctrica y es debida al movimiento de electrones libres. Son escasos los cuerpos que poseen este tipo de conductividad en la corteza terrestre.

Conductividad iónica.- Esta se presenta cuando el flujo de la corriente se efectúa por el movimiento de iones del fluido -- contenido en los poros o intersticios de las rocas.

En los estudios geoeléctricos la conductividad de las rocas se comporta según la segunda forma enunciada en la cual el fenómeno dieléctrico poco interviene en la conducción eléctrica que - predominantemente se efectúa por los electrolitos líquidos.

Polarización.- La polarización es función de la conductividad dieléctrica que permite las concentraciones de partículas (cargas eléctricas) dependiendo de la intensidad del campo eléctrico aplicado. Existen varios tipos de polarización que se presentan en forma independiente o simultáneamente en la aplicación de un campo eléctrico, ellos son:

Interfacial: Producida por la acumulación de cargas en las superficies límites o de separación entre diferentes materiales.

Electrónica: Debida al desplazamiento de los electrones de cada átomo con respecto a su núcleo.

Iónica: Originada por el desplazamiento de los iones con respecto a su posición de equilibrio en la red cristalina.

Dipolar: Producida por la orientación de las moléculas cuando -

éstas poseen momentos eléctricos permanentes y pueden considerarse como dipolos.

Actividad Electroquímica.- La actividad electroquímica está relacionada con la composición química de las rocas, pero principalmente con la composición y concentración de los electrolitos que las impregnán. De ello depende la magnitud y el signo del voltaje que se desarrolla cuando la roca se encuentra en desequilibrio con un determinado electrolito. En esto está basado el método de autopotencial o de potencial espontáneo.

La actividad electroquímica se presenta principalmente de dos formas:

1. Como potenciales de difusión que se producen cuando en los poros de las rocas se ponen en contacto electrolitos diferentes o existen diferencias de concentración en un mismo electrolito. Lo anterior se verifica debido a que los iones de diferente signo poseen desigual movilidad, y como los que la presentan mayor se difunden más rápidamente, llegan a formarse dos zonas, en cada una de las cuales predominan los iones de un signo y se establece una diferencia de potencial  $\Delta V$ .

2. Potenciales de electrofiltración que consisten fundamentalmente en la producción de un campo eléctrico por el movimiento de electrolitos (aguas subterráneas) a través de un medio poroso en el --

suelo. Cuando un electrolito pasa a través de una membrana porosa se produce entre los dos lados de ésta una diferencia de potencial. Las rocas pueden comportarse como tales membranas cuando poseen, por su porosidad, una red de conductos capilares a través de los cuales puede filtrarse agua subterránea. Las paredes de los capilares pueden absorber los aniones, los cuales atraen cationes, formándose una capa eléctrica doble. Los aniones permanecen fijos pero los cationes son arrastrados por la marcha del electrolito a través del capilar, por lo que se concenan junto a la salida y dan lugar a una diferencia de potencial.

Método de Resistividad.- Existen varios métodos de exploración - geoeléctrica que se basan en el estudio de la circulación de la corriente eléctrica en el subsuelo. Esta circulación puede ser - natural (Potencial Natural o Corrientes Telúricas) o artificial,- debida a la introducción de una corriente determinada.

De los métodos que requieren una fuente artificial se distinguen los inductivos y los conductivos, de los cuales los primeros requieren el uso de generadores con frecuencias de varios kilociclos y la medición del campo electromagnético creado por la corriente inducida en el terreno, y los últimos utilizan una corriente continua o alterna de sólo unas pocas decenas de ciclos/seg. y estudian el campo eléctrico generado.

En la exploración geotérmica los métodos que más se utilizan son los conductivos, concretamente los de resistividad en su variedad de sondeos eléctricos verticales, con el propósito de interpretar las características geológicas del subsuelo.

En la ejecución de la prospección geoeléctrica se introduce al terreno una corriente directa o conmutada de baja frecuencia (menor a un Hertz) por medio de dos electrodos. La diferencia de potencial generada a causa del campo eléctrico, se mide con otros dos electrodos, cuya posición respecto a los primeros puede ser muy variada. Así, con los registros de la corriente y potencial para cada posición del dispositivo electródico, es posible realizar un cálculo de la resistividad del subsuelo.

**Resistividad Eléctrica de Rocas y Suelos.-** La resistividad de rocas y suelos varía dentro de un rango amplio, ya que la mayoría de los minerales que los forman son prácticamente aislantes. La conductividad de éstos y el contenido de fluidos determinan la resistividad de las rocas y suelos.

Las rocas como cuerpos constituidos por una matriz aislante, deben su conductividad de conjunto a la red de conductos irregulares y tortuosos, desarrollados por una porosidad primaria o secundaria, llenos de un electrolito por el cual fluye la corriente.

Los límites de variación más usuales para la resistividad de las rocas más comunes se presentan en la Figura 3 junto con la de algunos minerales.

Las rocas ígneas y metamórficas suelen presentar resistividades comprendidas entre  $10^2$  y  $10^5$  ohm-m. En las rocas sedimentarias, es mayor la diversidad de resistividades. Los valores más altos corresponden a las evaporitas, en especial a la anhidrita y la sal gema cuya resistividad oscila entre  $10^4$  y  $10^6$  ohm-m. Más conductoras pueden ser las calizas, que presentan resistividades comprendidas generalmente entre  $10^2$  y  $5 \times 10^3$  ohm-m. Valores semejantes presentan las areniscas y dolomitas. Mayor conductividad aún presentan las margas con resistividades que suelen variar entre 1 y  $10^2$  ohm-m.

La resistividad de las rocas detríticas y clásticas crece con el tamaño del grano, siendo para las arcillas de 1 a 50 ohm-m, de 10 a  $10^2$  ohm-m para los limos, de  $10^2$  a  $10^3$  ohm-m para las arenas - y de  $10^2$  a  $10^4$  ohm-m para las gravas; todo esto suponiendo que tengan agua dulce. La resistividad de las arenas impregnadas de agua salada es muy inferior a la indicada y puede descender hasta 0.1 ohm-m.

En los afloramientos de diversas formaciones, la capa superficial

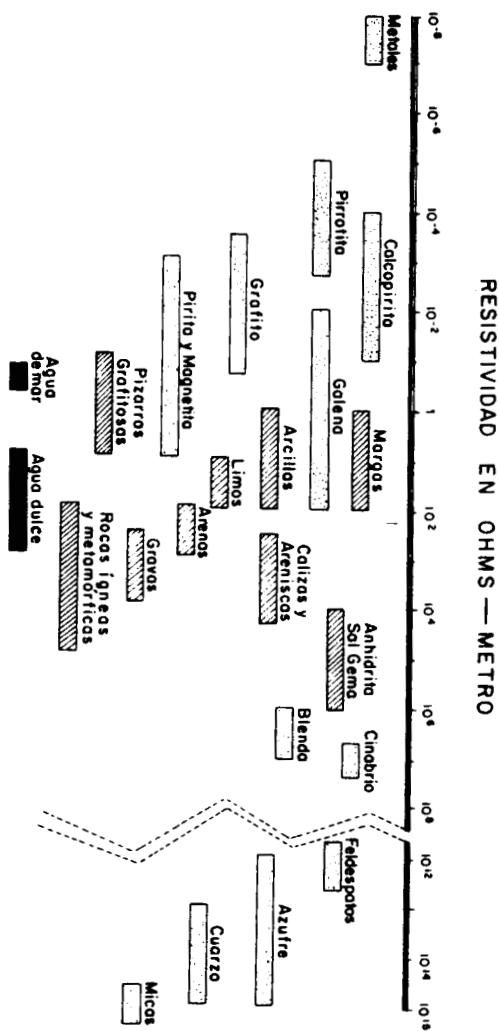


Figura 3 Gráfica de los límites de variación de la resistividad en algunas rocas y minerales.  
La fisuración, impregnación de agua salada, etc., pueden extender estos límites.

meteorizada suele presentar menor resistividad que la roca sana, por causa de su mayor porosidad. Esto no ocurre siempre, sino - que se observa a veces la llamada paradoja de los suelos, según - la cual, los suelos de regiones de clima seco o desértico pueden tener menor resistividad que los de zonas de clima muy húmedo, en contra de lo que cabría esperar de la disminución de la resistividad con el contenido de agua. La razón de este fenómeno es la siguiente: en zonas de clima muy seco es frecuente la ascención de agua hacia la superficie, a través de poros capilares, con ulterior evaporación y consiguiente aumento del contenido iónico de las capas superficiales. En las regiones húmedas, por el contrario, la intensa circulación de agua en las capas superficiales disuelve y arrastra los iones, con lo que tales capas quedan muy empobrecidas de ellos. De ahí la mucho menor conductividad en el segundo caso respecto del primero en relación con la roca sana (E. Orella- na, 1972).

Factores que afectan la resistividad.- Los factores que afectan la resistividad de las rocas saturadas son: el grado de saturación - de los poros, la salinidad de los fluidos saturantes, el factor -- geométrico de dichos poros, la conductividad de la matriz, la tem- peratura y la presión.

Como el agua contenida en los espacios porosos de las formaciones es el agente dominante en la conducción eléctrica a través de los electrolitos que contiene, se han definido algunas relaciones em-

píricas entre la resistividad del agua la cual satura una roca dada, la resistividad total de la roca, y la porosidad de ésta.

Una de estas relaciones es dada por la ecuación de Archie que define el factor de Formación F, ésto es:

$$F = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad (7)$$

Donde:

$\rho_o$  = resistividad de la roca saturada

$\rho_w$  = resistividad del electrolito el cual satura la roca.

F = factor de formación, siendo éste una constante de proporcionalidad para una roca dada a una porosidad dada.

La ecuación de Archie también ha sido desarrollada para cubrir las variaciones del factor de formación respecto a la porosidad, es decir:

$$F = k \phi^m \quad (8)$$

Donde:

$\phi$  = porosidad

m = es una constante, generalmente cercana a 2

k = es un número cercano a la unidad (0.7 a 1.2)

De 7 y 8 resulta que:

$$\rho_o = k \phi^m \rho_w \quad (9)$$

La constante  $m$  varia de 1.2 a 1.5 en rocas no consolidadas y en las muestras de canal de los recortes de pozos. Es próxima a - 3.5 para rocas antiguas y rocas cristalinas. En algunas ocasiones  $m$  se considera como el "factor de cementación", sin embargo, está más relacionada con la tortuosidad en las formaciones que - con la cementación (Meidav, 1979).

En la Figura 4 , se presenta un nomograma que relaciona la po rosidad y el factor de formación para cualquier valor común de  $m$ . Como se puede observar de la ecuación (8) el factor de formación  $F$  varía aproximadamente con el cuadrado inverso de la porosidad, y de la ecuación (9) que la resistividad de la roca varía de la - misma forma con respecto a la porosidad. Por lo tanto, manteniendo todos los factores constantes en una roca dada y aumentando - la porosidad, se producirá una reducción de la resistividad en - ella.

Estas relaciones han sido ampliamente usadas en los cálculos de - la porosidad del subsuelo por medio del empleo de registros de -- pozos.

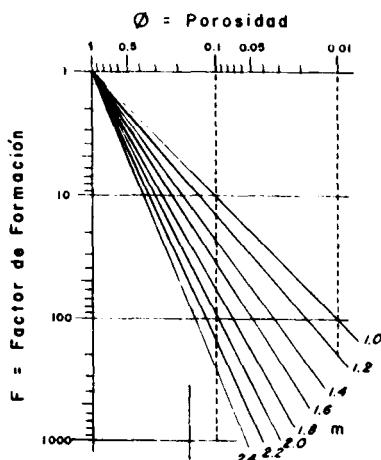


Figura 4 Nomograma que relaciona el factor de Formación y la Porosidad.

En la mayoría de los casos, el agua que satura los espacios porosos consiste de una solución de diferentes sales, dentro de las cuales la dominante es el NaCl. La concentración salina de esas soluciones influye en la resistividad de las formaciones de una manera inversa, ya que al aumento de salinidad corresponde un decremento de resistividad. Así manteniendo los demás factores constantes los cambios de resistividad pueden ser empleados para determinar los cambios de salinidad. Lo anterior ha sido utilizado en el estudio de intrusiones salinas bajo pequeñas islas y en la determinación de salinidad regional.

La resistividad del agua contenido NaCl a baja o media tempera

tura y a una presión determinada, está dada por la relación:

$$\rho_w = k e^{-0.00821t}$$

Donde:

$\rho_w$  = resistividad del agua en ohm-m

k = constante que depende de la concentración de electrolitos en el agua. Para una baja salinidad, una solución de 0.001 de NaCl, el valor de k es 100

t = temperatura en °C

Debe tomarse en cuenta que la dependencia de la resistividad del agua con la temperatura y presión es mucho más complicada que la expuesta en párrafos superiores.

El incremento de temperatura y presiones del agua por debajo de la temperatura de ebullición, manteniendo una concentración salina constante, produce una disminución en la resistividad; y para temperaturas mayores o cercanas a la crítica, se presenta un incremento en la resistividad debido a una gran disminución en las características dieléctricas que provocan un decrecimiento en el fenómeno de polarización de las moléculas, forzando a los iones a formar partículas neutras. Dicho incremento en la resistividad es menor cuando existen mayores presiones.

La temperatura aproximada del líquido incluído y por consiguiente

te la temperatura de la roca, puede ser estimada si la salinidad y la resistividad del agua son conocidas por medio de registros-de pozos.

Como se concluye de párrafos anteriores, la resistividad de las rocas que contienen agua depende de la cantidad de agua presente, la salinidad de ella y la forma en la cual está distribuida en - la roca. Estas tres características no son igualmente importantes, ya que la resistividad de las rocas varía más ampliamente - por la diferencia en el contenido de agua, la cual puede variar- en una proporción de 1000:1 entre algunos tipos de rocas. Pues-  
to que el contenido de agua entra en la ley de Archie como una - cantidad al cuadrado, este rango de variación contribuye en  $10^6:1$  en la resistividad volumétrica, siendo los otros factores los -- mismos. La salinidad del agua contenida es de segunda importan-  
cia, en parte porque ella entra en la ley de Archie sólo a la po-  
tencia unitaria, y porque el rango de variación de la resistivi-  
dad del agua está limitado por interacciones con los minerales -  
de la roca en proporción de 500:1. Por lo tanto, permaneciendo-  
los otros factores iguales, las variaciones en la salinidad del  
agua pueden causar cambios en la resistividad volumétrica en pro-  
porción de 500:1. Por lo tanto, permaneciendo los otros facto-  
res iguales, las variaciones en la salinidad del agua pueden cau-  
sar cambios en la resistividad volumétrica en proporción 500:1.

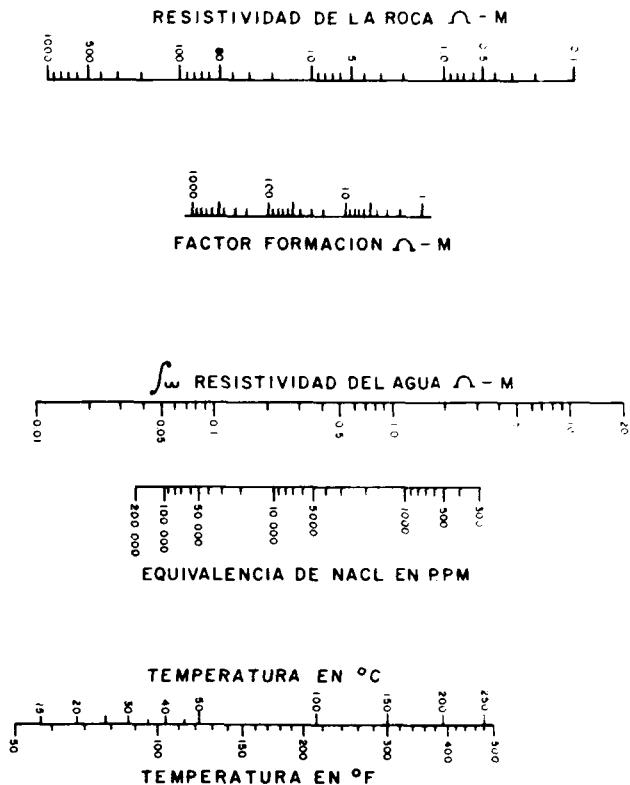


Figura 5 Nomograma que relaciona la Salinidad, Resistividad del agua, la temperatura, Resistividad de la roca y el factor de Formación.

La distribución del agua en la estructura de los poros es el -- factor de menor importancia, ya que causa una variación en la resistividad volumétrica no mayor que 20:1, siendo los otros factores iguales.

La resistividad de las rocas que contienen agua también es afectada por los cambios de temperatura y presión, aunque en grado menor que por los factores anteriores.

La razón por la cual los yacimientos geotérmicos frecuentemente poseen un contraste de resistividad, se explica por el hecho de que en la naturaleza existe una combinación de factores que amplifican el efecto de su conductividad eléctrica. Algunos de estos factores son:

1.- En yacimientos geotérmicos el agua normalmente es más salada, debido a que el agua caliente disuelve una mayor cantidad de sales en la roca.

2.- En un sistema geotérmico convectivo, prevalece una mayor porosidad, debido a que los líquidos calientes disuelven más los minerales de las rocas.

3.- La alteración hidrotermal de las rocas ígneas en arcilla y - zeolitas, disminuye la resistividad volumétrica de la roca.

En el caso de la prospección geotérmica, para el empleo del SEV\* se ha hecho la asociación de que el factor temperatura cuando llega a un valor alto, tiene el efecto de disminuir el valor de la resistividad de las rocas, pero el aumento de la porosidad en la roca tiene el mismo efecto o mayor. De lo anterior puede deducirse lo siguiente: una zona de baja resistividad no necesariamente reflejará la existencia de un yacimiento geotérmico, pero dicho yacimiento necesariamente tendrá un valor bajo de resistividad.

Isotropía y Anisotropía.— La anisotropía eléctrica de una roca se presenta cuando su microestructura se encuentra dispuesta en tal forma que el paso de corriente eléctrica no tiene la misma magnitud en todas las direcciones. Si por lo contrario se tiene una roca que al paso de la misma corriente se comporta igual en todas las direcciones, se dice que la roca es eléctricamente isotropa y su resistividad específica se mantiene constante.

En investigaciones geoeléctricas, generalmente son considerados tres tipos de anisotropía: micro, macro y pseudoanisotropía. La microanisotropía es aquella en la cual los granos de la roca son individualmente anisótropos por causa de su estructura. Este fenómeno geológicamente se presenta en capas compuestas de pequeños elementos de diferentes minerales. Como en el caso de una -  
\*Sondeo Eléctrico Vertical.

capa de arcilla donde el plano de estratificación horizontalmente alineado tiene los granos separados por capilaridad laminar - de agua.

La macroanisotropía resulta de la alternancia repetitiva de diferentes facies litológicas (cada una de ellas isótropa). Este fenómeno de anisotropía es totalmente diferente de la microanisotropía. En general se superponen ambos efectos.

La pseudoanisotropía es esencialmente un término teórico, que resulta de la combinación matemática de dos o más efectos anisótropos en una sola capa. En este caso, las capas no necesitan ser de un gran espesor ni repetidas alternancias como en los casos de micro y macroanisotropía, respectivamente.

#### SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES (SEV)

Los sondeos eléctricos verticales (SEV) son una variante dentro de los métodos eléctricos y encuentran su principal aplicación -

en regiones cuya estructura geológica puede considerarse formada por estratos horizontales. La finalidad del SEV es la determinación de las profundidades de las capas del subsuelo y las resistividades o conductividades eléctricas de las mismas, mediante mediciones efectuadas en la superficie, utilizando separaciones electródicas variables.

La calicata eléctrica constituye una aplicación menor de los sondeos eléctricos verticales, ya que en ellas se trabaja con distancias electródicas constantes con el objeto de detectar y delimitar cambios laterales de resistividad.

Casi todos los métodos eléctricos requieren del uso de 4 electrodos clavados en el suelo; un par de ellos sirve para introducir en el terreno una corriente eléctrica, mientras que el segundo par se utiliza para medir la diferencia de potencial que se establece entre ellos como resultado del paso de la corriente eléctrica. Los diferentes dispositivos electródicos sólo difieren en la posición de los cuatro electrodos.

Se ha definido que para un medio infinito homogéneo e isótropo de resistividad  $\rho$ , el potencial eléctrico  $V$  causado por un electrodo puntual en A, que emite una corriente eléctrica  $I$ , en cualquier punto P (Fig. 6) está dado por:

$$V = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (10)$$

Donde:  $\vec{r} = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$  (11)

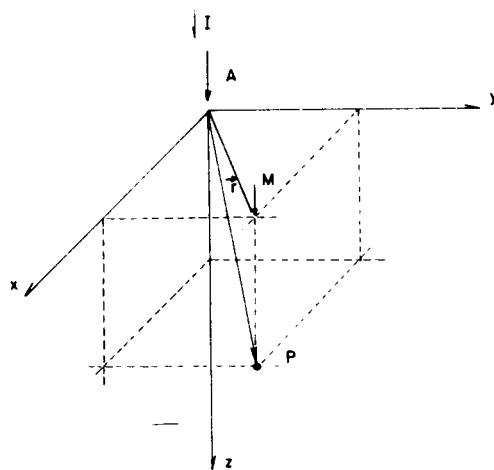


Figura 6. Electrodo puntual en un espacio homogéneo.

Para un semiespacio infinito, situación que se aproxima al caso real en la superficie terrestre  $Z = 0$ , se tendrá:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi(x^2 + y^2)^{1/2}} = \frac{\rho I}{2\pi AM} \quad (12)$$

Donde  $\overline{AM}$  es la distancia sobre la superficie terrestre entre un - electrodo de corriente en A y un electrodo de potencial en M.

Considerando el caso general de un dispositivo tetraelectródico - colocado en la superficie de un semiespacio eléctricamente homogéneo e isótropo, (Figura 7) los electrodos de corriente A y - B sirven: uno para inyectar corriente al terreno y el otro para cerrar el circuito. Asignando al electrodo A el polo positivo de - la fuente y a B el negativo, el potencial V en el punto donde se encuentra el electrodo de medida de potencia M, resulta ser:

$$V_M = \frac{\rho_1}{2} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (13)$$

De igual forma en el electrodo N se tendrá:

$$V_N = \frac{\rho_1}{2} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (14)$$

y la diferencia de potencial  $\Delta V$  que se leerá con un voltímetro entre los puntos M y N sera:

$$V = V_M - V_N = \frac{\rho_1}{2} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (15)$$

si despejamos la resistividad  $\rho$  de la ec. 15, resulta:

$$\rho = \frac{V}{\frac{1}{2} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} \quad (16)$$

De la ecuación 16, la resistividad  $\rho$  para un medio homogéneo está dada como:

$$\rho = \frac{2}{K} \cdot \frac{V}{I} \quad (17)$$

donde:

$$K = \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

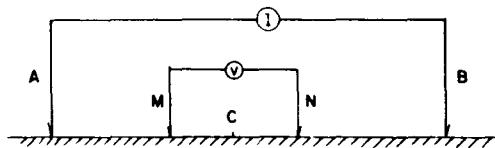


Figura 7. Dispositivo tetraelectródico general.

**Resistividad aparente.-** El valor de resistividad que se obtiene por medio de la ecuación 17 para un medio homogéneo, será diferente en un medio inhomogéneo utilizando el mismo dispositivo. Sin embargo, se puede seguir aplicando dicha ecuación y obtener con ella un valor ficticio de  $\rho$ , que se denomina "resistividad aparente"; puede ser definida como la de un medio homogéneo en el que, con la misma corriente I, se observaría la misma caída de poten-

cial  $V$  en el medio inhomogéneo, por lo que  $\rho_a$  es:

$$\rho_a = \frac{2\pi}{K} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (18)$$

El valor del concepto de resistividad aparente radica en el hecho de que proporciona una medida de la "desviación" respecto de un subsuelo homogéneo e isotropo. La magnitud  $\rho_a$  ha sido normalizada de modo que para un subsuelo uniforme no depende de la intensidad de corriente, disposición electródica, ni de la separación entre electrodos.

La resistividad aparente como la verdadera tienen las dimensiones de una resistencia multiplicada por una longitud. La unidad más ampliamente usada es el ohm-m, aunque el ohm-cm y el ohm-pie se emplean algunas veces.

Dispositivos electródicos.- Existen numerosos dispositivos o arreglos electródicos. Entre los principales se encuentran el -- Wenner, el Schlumberger y variantes de estos como, Schlumberger - de 3 electrodos, Wenner de 3 electrodos y los dispositivos dipolares.

El dispositivo Schlumberger es el de uso más extendido para la ejecución de SEV. Comparado con el Wenner, presenta la ventaja importante de ser menos sensitivo ante inhomogeneidades laterales a causa de la inmovilidad de los electrodos de potencial (M y N)

durante una serie de mediciones consecutivas. Además, el trabajo de campo se efectúa con mayor rapidez. El dispositivo Schlumberger presenta algunas desventajas respecto al Wenner, pues deben efectuarse ciertas correcciones a los datos de campo antes de su interpretación y los instrumentos de medición exigen mayor sensibilidad. En la actualidad este aspecto es de menor importancia dado el gran avance en lo que respecta a instrumentos electrónicos.

Las modalidades con tres electrodos de ambos dispositivos, presentan ventajas en ciertas circunstancias. Estos se emplean generalmente cuando se presentan obstáculos (lagos, barrancos, etc.) que impiden la disposición electródica simétrica.

Los dispositivos dipolares en general reducen al mínimo los acomplamientos entre circuitos, así como los problemas de manejo de cables muy largos, y se han empleado para prospecciones a mayores profundidades que las alcanzadas por los dispositivos Wenner y -- Schlumberger.

Para cada dispositivo electródico se deduce la fórmula de resistividad aparente a partir de la ecuación 18.

Dispositivos Wenner, Schlumberger y Dipolares.- Para el dispositivo Wenner, los 4 electrodos A, M, N y B se colocan en la superficie del terreno colinealmente, de tal manera que la distancia interelectródica es igual, es decir  $AM=MN=NB=a$ . En este arreglo

el valor de la resistividad aparente de acuerdo con la ecuación general (ec.18) se reduce a:

$$\rho_a = \frac{2\pi a}{I} \cdot \frac{\Delta v}{I} \quad (19)$$

El dispositivo Schlumberger de 4 electrodos utiliza, a diferencia del Wenner, la distancia AB igual o mayor 5 veces la distancia MN.

En la configuración Schlumberger la constante K del dispositivo, - de acuerdo a la ecuación (17), tiene un valor de:

$$K = \left[ \frac{(L^2 - I^2)}{4I} \right] \quad (20)$$

De donde se obtiene de acuerdo con la ecuación general la siguiente fórmula para calcular la resistividad aparente:

$$\rho_a = \frac{\pi}{21} \frac{(L^2 - I^2)}{I} \cdot \frac{\Delta v}{I} \quad (21)$$

El dispositivo Schlumberger es un dispositivo "límite" el cual - presenta grandes ventajas teóricas, las cuales pueden llevarse a la práctica con suficiente aproximación. La idea de este dispositivo es hacer que la distancia I, semidistancia entre M y N, tenga a cero. Reagrupando la ecuación (21) se tiene:

$$\rho_a = \frac{\pi}{21} \frac{(L^2 - I^2)}{I} \cdot \frac{\Delta v}{I} \quad (22)$$

donde el segundo miembro no tiende a infinito (prácticamente) y, - por lo tanto,  $\Delta v$  decrece al mismo tiempo que I. Entonces se tie

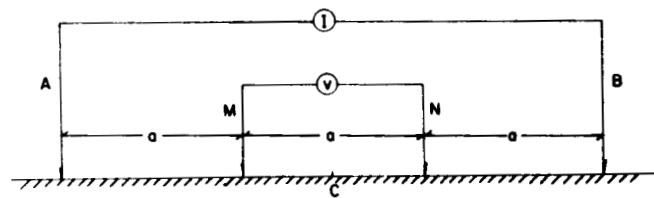


Figura 8 . Dispositivo Wenner

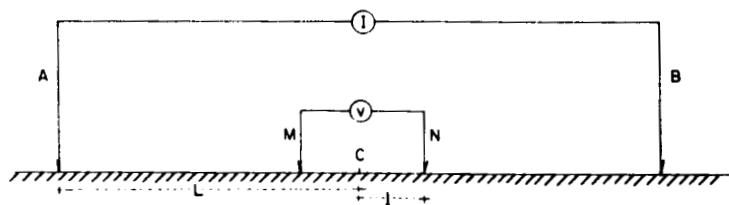


Figura 9 . Dispositivo Schlumberger

ne que:

$$\rho_a = \lim_{l \rightarrow 0} \pi (L^2 - l^2) \frac{\Delta V}{2l} = \frac{\pi L^2}{2l} \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{l}$$

$$\therefore \rho_a = \pi L^2 \cdot \frac{E}{2l} \quad (23)$$

ya que el límite de  $\Delta V/l$  cuando  $l \rightarrow 0$ , es el gradiente del potencial, o sea el campo eléctrico E.

La idea de Schlumberger consiste en utilizar una distancia MN=2l muy corta, de tal modo que pueda tomarse como válida la ecuación 23. En los desarrollos teóricos se establece que lo que se mide realmente es el campo E, lo cual en la práctica se toma igual a  $\Delta V/l$ . Es decir que, si bien en la teoría matemática se emplea la fórmula 23, en las observaciones de campo la que se utiliza realmente es:

$$\rho_a = \pi L^2 \cdot \frac{\Delta V}{2l} \quad (24)$$

Por lo que el error que se comete al emplear esta ecuación es sólo el que proviene de despreciar el término  $l^2$  de la ecuación -(21), y este error es muy pequeño. En las mediciones de campo - suele tomarse la norma de que  $MN \ll AB/5$ , como  $MN = 2l$  y  $2L = AB$ , el error relativo será de un 4%.

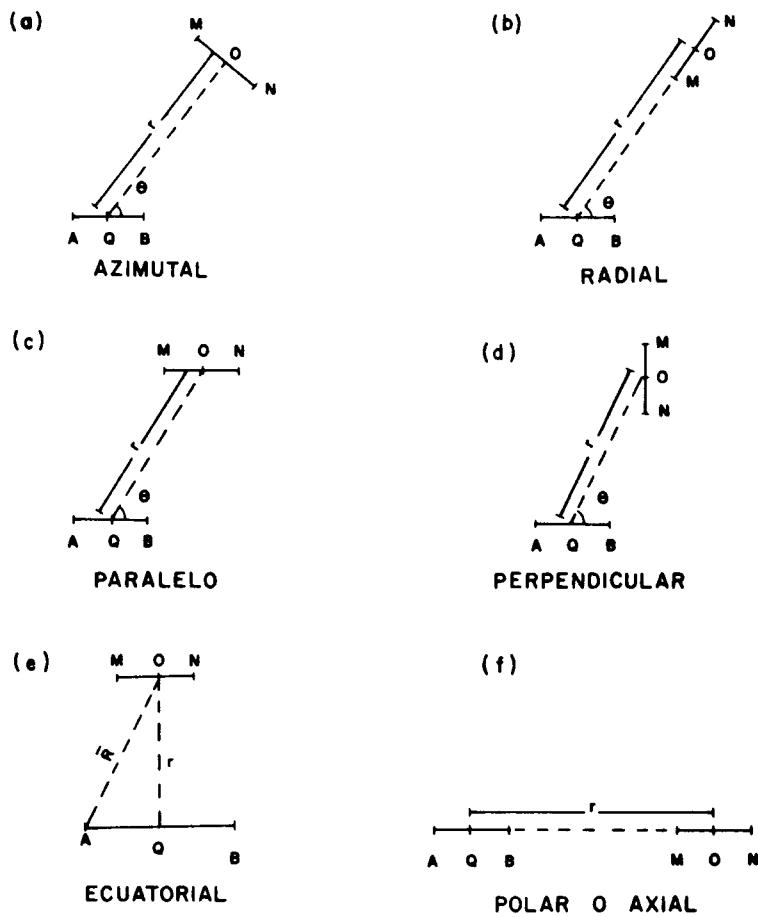
Los dispositivos dipolares constituyen una familia importante, - la cual se caracteriza porque en ellos los electrodos de corrien-

te A y B (dipolo de corriente), están muy próximos entre sí, en relación con las distancias a las cuales se miden sus efectos.

En estos dispositivos se emplean 2 dipolos, uno de emisión (AB) y otro de recepción (MN), cuya posición mutua puede ser cualesquiera. Dependiendo de la posición de los dipolos se les ha asignado su nombre, siendo los más usuales: el Paralelo, que como su nombre lo indica, en él, los dipolos son paralelos entre sí; - Perpendicular, cuando los dipolos forman un ángulo recto; Radial, cuando el dispositivo de recepción se halla sobre la recta que une los centros de ambos dipolos; y Azimutal en el caso de que el dipolo MN sea perpendicular a la recta que une los centros de ambos dipolos.

Desde el punto de vista práctico existen dos variantes o casos particulares de los anteriores, el dispositivo Ecuatorial, que es al mismo tiempo paralelo y azimutal, ya que ambos dipolos son paralelos entre sí y perpendiculares a la recta que une sus centros; y el dispositivo Eltrán, también llamado Polar Axial, que es simultáneamente paralelo y colineal. (Figura 10).

Para un levantamiento eléctrico utilizando dispositivos dipolares es necesario contar con un generador de gran capacidad, para proporcionar una elevada intensidad de corriente, debido a la distancia a la que queda instalado el dipolo de recepción. Generalmen-



## EXPLICACION

- AB Dipolo de corriente
- MN Dipolo de Voltaje
- r Distancia entre dipolos
- O Centro del dipolo MN
- Q " " " AB
- $\theta$  Angulo entre dipolos en su caso

Figura 10

te la interpolación de los datos obtenidos con estos dispositivos, requieren de un tratamiento especial que involucra un amplio conocimiento de la respuesta del terreno a los dispositivos dipolares; sin embargo, algunos dispositivos como el Ecuatorial pueden ser tratados en forma similar a la usual con el dispositivo Schlumberger e incluso es factible el uso de las mismas curvas maestras.

**Penetración de Corriente.-** Se llama profundidad de penetración - de corriente de un SEV a la mayor profundidad sobre la que se obtiene información. Se ha demostrado que para un terreno homogéneo la fracción de la corriente total que queda confinada entre la superficie y un plano horizontal a la profundidad  $Z$ , es  $P = 2t\bar{g}^1\left(\frac{Z}{L}\right)$  donde  $L$  es la mitad de la distancia entre los electrodos de emisión de corriente.

De lo anterior se deduce que el 50% de la corriente total jamás penetra por debajo de la profundidad  $Z = L$ ; que el 70.6% no pasa - nunca más allá de  $Z = 2L$ . De ésto resulta evidente que la corriente penetra más cuanto mayor sea la separación entre los electrodos, sin embargo, debe observarse que no existe una relación directa entre la penetración de la corriente y la distancia entre - los electrodos.

Ahora bien, para un medio heterogéneo este concepto se torna com-

plejo ya que depende de la distribución de resistividad en el subsuelo, y en algunas áreas se presentan estratos de elevada conductividad o de alta resistividad superficial que impiden el paso de la corriente por debajo de ellos, entonces por grande que sea la distancia AB, la corriente no podrá superar la profundidad de la base de dichos estratos.

Lo más viable en cuanto a la determinación de la profundidad de exploración deseada respecto al espaciamiento AB, es la ejecución de sondeos de prueba en el área por estudiar.

**Corrientes Perturbadoras y Polarización de Electrodos.-** A través del dipolo MN denominado de recepción, no llega solamente la diferencia de potencial debida al campo creado por la corriente introducida por medio de los electrodos AB, que es la señal que se desea medir, ya que también llegan otras que pueden ser naturales (efectos de polarización y corrientes telúricas) o artificiales (instalaciones industriales, torres de transmisión, ferrocarriles, etc.). Las artificiales tienen carácter local mientras que las naturales se encuentran en toda la superficie terrestre.

Para la supresión de dichos efectos, generalmente se usa un dispositivo de compensación, que consiste esencialmente de una pila y un divisor de tensión. Este dispositivo proporciona el voltaje necesario para compensar los efectos indeseables al momento de la to-

ma de datos.

El fenómeno de polarización se presenta en los electrodos de recepción, y tiene su origen en la reacción química que se produce entre los electrodos metálicos y los electrolitos del subsuelo; en esta forma su comportamiento es similar al de una pila eléctrica. Si la concentración y naturaleza de los electrolitos en el terreno fuesen iguales se anularían, pero a causa de sus inhomogeneidades esto no sucede.

La polarización de los electrodos de cobre es menor que la que presentan los electrodos de acero, motivo por el cual son recomendables los primeros. Pero un tipo más recomendable son los llamados imposibilitables, que constan de un vaso o vasija porosa llena parcialmente con una solución de sulfato de cobre y sumergida en ella una varilla de cobre. Este tipo de electrodos son ampliamente utilizados en levantamientos de Potencial Natural.

Conductancia Longitudinal y Resistencia Transversal.- A menudo la resistividad de las rocas, independientemente de cualesquiera de los factores que afectan esta propiedad física, depende de la dirección en la que se introduce la corriente a través de ella. El efecto de anisotropía de las rocas estratificadas es posible apreciarlo teóricamente, si examinamos la resistencia eléctrica total de una columna-unitaria formada por diferentes capas de espesor  $h_i$  y resistividad -

$\rho_i$ . (Figura II). Si la corriente fluye en dirección perpendicular a la estratificación la resistencia total es la "Resistencia Transversal Unitaria" y se expresa matemáticamente como:

$$T = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i \quad (25)$$

Por otro lado, si la corriente fluye paralela al plano de estratificación, entonces la resistividad total será la "Resistencia Longitudinal Unitaria" o su inversa la "Conductancia Longitudinal", la cual se expresa como:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} \quad (26)$$

Como puede observarse de las ecuaciones (25) y (26), tanto T como S son aditivos para cada corte geoeléctrico y a ellos Maillet les dió el nombre de parámetros de Dar Zarrouk. En los trabajos desarrollados por él, demostró que cada curva de SEV no refleja en general el efecto independiente de espesores y resistividades, sino lo que influye decisivamente sobre la morfología de dichas curvas son los productos y cocientes del espesor y resistividad de cada capa. Los parámetros mencionados representan un papel importante en la teoría de interpretación de sondeos geoeléctricos.

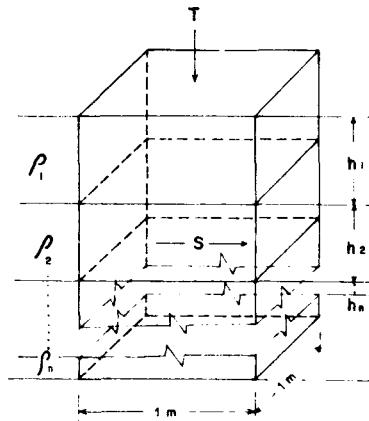


Figura 11. Definición de los parámetros de Dar Zarrouk.

**Aplicaciones y Limitaciones del Método.-** Entre las aplicaciones -- más comunes del método eléctrico de resistividad se cuentan los estudios estructurales para investigaciones petroleras. Estas aplicaciones son poco conocidas en occidente, no así en la Unión Soviéti- ca donde han sido ampliamente empleadas. Otras aplicaciones de los métodos son las investigaciones de agua subterránea, estudios de ingeniería civil, investigaciones a profundidad reducida para la localización de objetos y edificaciones enterradas, como guía para las investigaciones arqueológicas y como una valiosa herramienta en la prospección geotérmica.

Un requisito indispensable para la aplicación del método eléctrico SEV, es que las formaciones o estratos que se deseen distinguir, - presenten suficiente contraste de resistividad que haga posible su diferenciación eléctrica. Otra condición para el empleo del método, es que la superficie del terreno sea relativamente plana. Esta condición es menos estricta para los SEV con espaciamientos AB grandes (también llamados SEV profundos), ya que las variaciones topográficas producen efectos aún no cuantificables para su corrección a causa de las complicaciones teóricas que presenta la solución de dicho problema; pero en el caso de efectuar una campaña en un área con variaciones topográficas notables, éstas deberán ser consideradas por el intérprete.

Otro requisito necesario para la correcta aplicación del método, es que las formaciones geológicas sobre las que se realice el SEV posean cierta homogeneidad lateral, lo que exige tener especial cuidado en el emplazamiento de cada SEV. De no ser así se producirán variaciones en las curvas que se obtengan y también, como en el caso de los efectos topográficos, su eliminación no es cuantificable.

Debido a dichos efectos la interpretación se torna difícil y ésta deberá ser ejecutada por personas con conocimientos de física y -- geología, con experiencia en la aplicación del método para poder evaluar los susodichos efectos indeseables y las perturbaciones producidas por las corrientes telúricas o las de origen industrial. -

Sin embargo, estas perturbaciones, especialmente las últimas, pueden eliminarse ahora en la mayoría de los casos, mediante el empleo de instrumental moderno y adecuado.

Desarrollo del Levantamiento de Campo.- El desarrollo del trabajo de campo dentro de cualquier programa de exploración, es parte fundamental dentro del proceso de investigación, ya que de su buena realización depende en gran parte el resultado final del estudio, por lo cual la toma de datos deberá realizarse correctamente.

Para lograr lo anterior, deberá seguirse un plan de trabajo adecuado a las características del problema abordado y a las condiciones locales. Dicho plan se programará en base a la información del área, planos topográficos y geológicos, fotografías aéreas y estudios anteriores en dicha zona e información de pozos. Estos datos proporcionan la base para el emplazamiento de los sitios de SEV y orientación de las líneas de estudio.

#### I N T E R P R E T A C I O N

La interpretación de un levantamiento geofísico por sí sola únicamente proporciona información de las características físicas del terreno, por lo cual resulta indispensable el conocimiento geológico superficial para relacionar la respuesta física con condiciones

geológicas del subsuelo, sobre todo si existe información del mismo obtenida por medio de pozos u otros métodos geofísicos.

El proceso de interpretación del levantamiento geoeléctrico en el Valle de Mexicali, se efectuó en dos etapas, una cualitativa y otra cuantitativa, para tratar de definir un modelo acorde a las condiciones geológicas del área, sin embargo, resulta difícil y en algunos casos imposible, relacionar los valores de la resistividad con diversas condiciones geológicas, dado que la resistividad como se comentó es una de las propiedades físicas que presenta mayor rango de variación.

Si bien la temperatura es un factor que decrementa el valor de la resistividad en las formaciones, éste no es determinante para la localización de áreas con posibilidades geotérmicas, ya que la porosidad y salinidad y otros factores producen el mismo efecto. El problema que se presenta en la interpretación de los estudios geoeléctricos en zonas geotérmicas, es determinar si el efecto de la temperatura es tal que por su magnitud pueda ser diferenciado de los otros parámetros que la afectan.

Interpretación Cualitativa.- La interpretación cualitativa tiene como finalidad obtener una idea general de la geología del subsuelo estudiado.

En esta fase interpretativa se efectúan correlaciones específicas sin tomar en cuenta profundidades ni resistividades absolutas, únicamente se relacionan las características peculiares de cada uno de los SEV con el conocimiento geológico del área. De esta manera es factible diferenciar zonas con diversas condiciones como -- pueden ser zonas de fracturamiento, áreas con un alto contenido - salino, regiones de manifestaciones termales, cambios de forma - ción, etc.

La experiencia ha demostrado que resulta indispensable la ejecución de esta etapa interpretativa a la par con el levantamiento, pues permite, dependiendo de los resultados, la modificación del programa encuasándolo a las zonas anómalas de interés.

Esta fase de interpretación en el levantamiento, incluye un análisis comparativo entre las curvas de los SEV, así como la construcción de perfiles y planos de iso-resistividades aparentes para diversos espaciamientos de AB/2, los que proporcionan una idea general del comportamiento eléctrico en la zona de estudios como base para la subsecuente interpretación cuantitativa.

Interpretación Cuantitativa.- En la interpretación cuantitativa se pretende determinar las profundidades, espesores y resistividades de cada una de las capas que componen el corte geoeléctrico del subsuelo. El procedimiento utilizado en este estudio fué el

de comparación gráfica de las curvas de campo, con las de la colección de curvas patrón de E. Orellana y Mooney, además de las editadas por la Asociación Europea de Geofísica de Exploración - (Standard Graphs for Resistivity Prospecting), siguiendo la técnica del método de punto auxiliar que permite reducir las curvas de campo a otras de menor número de capas. Se dispuso también -- del uso de un programa de computadora (Programa para el cálculo de las resistividades en un medio estratificado, referencia al -- programa en ALGOL de S.M. Argelo 1976) con el cual se calcula -- ron las curvas teóricas de un corte dado para los valores de resistividad y profundidad interpretados por el método de comparación gráfica.

Tipos de Curvas.- El problema con que se encuentra el intérprete geofísico, es el determinar la distribución vertical de resistividades en el punto investigado, partiendo de la curva de resistividades aparentes suministrada por el sondeo eléctrico vertical. La solución de este problema al que se le denomina inverso, exige la previa solución y estudio del problema directo, ésto es, el de determinar la curva de resistividades aparentes que se obtendrá con un dispositivo determinado, sobre un subsuelo -- cuya distribución de resistividades se conoce.

Los métodos principales que se han utilizado para abordar el problema directo son dos, los cuales en último término son equiva--

lentes. El primero de ellos es el conocido como método de las imágenes, empleado para medios estratificados por J.C. Maxwell y aplicado a la prospección geoléctrica por J.N. Hummel. • El segundo método es la integración de la ecuación de Laplace al caso de medios estratificados. En las obras de Keller y Frinschkenkenecht- (1966) y de Orellana (1972) se describen los métodos de imágenes y el de la integración de la ecuación de Laplace, respectivamente.

La forma de las curvas para sondeos sobre medios estratificados - horizontales, es función de las resistividades y espesores de las capas, así como también de la configuración electródica.

Si el terreno se compone de dos capas, una primera capa homogénea e isotrópica de espesor  $h_1$  y resistividad  $\rho_1$ , sobreyaciendo a un estrato de espesor infinito  $h_2 = \infty$  y resistividad  $\rho_2$ , entonces la curva del sondeo empieza, para un espaciamiento pequeño de electrodos, con un segmento horizontal  $\rho_a \approx \rho_1$ . Cuando el espaciamiento de electrodos se incrementa la curva sube o baja dependiendo de los valores  $\rho_2$  y de  $\rho_1$  y de la configuración de electrodos utilizada. En espaciamientos mucho más grandes de electrodos que el espesor de la primera capa, la curva del sondeo se aproxima -- asintóticamente a una línea horizontal cuya ordenada es igual a  $-\rho_2$ . La distancia interelectródica en la cual la resistividad aparente se aproxima asintóticamente al valor de  $\rho_2$ , depende de 3 -- factores: el espesor de la primera capa  $h_1$ , el valor de la rela--

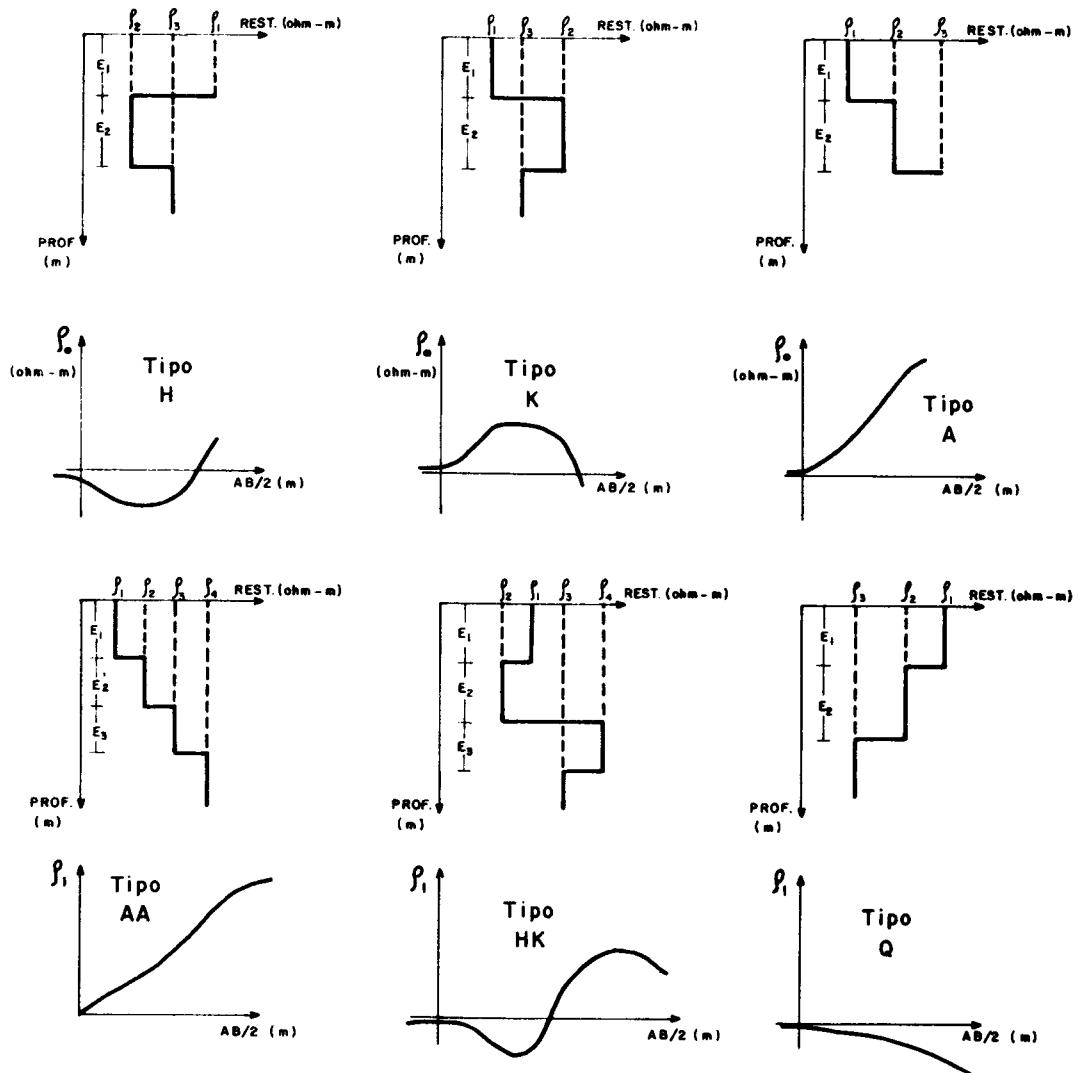


Figura 12. Curvas de Resistividad eléctrica para diversos cortes Geoeléctricos.

ción  $\rho_2/\rho_1$ , y el tipo de arreglo electródico.

Si el subsuelo se compone de 3 capas de resistividades  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ , y espesores  $h_1, h_2$  y  $h_3$ , el corte geoeléctrico se describe de acuerdo con la relación entre los valores  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ . Hay cuatro posibles combinaciones entre los valores  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ .

El uso de las letras H, A, K y Q para describir la relación entre  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  en el corte geoeléctrico, es muy conveniente y también se usa para describir la curva correspondiente del sondeo. Por ejemplo, una curva de sondeo eléctrico del tipo H, indica - - - -  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ . Curvas de 3 capas tipo H, A, K y Q se muestran en la Figura 12.

Si el terreno se compone de más de tres capas horizontales de resistividades  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  y espesores  $h_1, h_2, \dots, h_n$ , el corte geoeléctrico se describe en términos de las relaciones entre las resistividades de las capas. Y las letras H, A, K y Q se usan en combinaciones, para indicar la variación de resistividad de acuerdo con la profundidad. En cortes geoeléctricos de 4 capas hay 8 posibles combinaciones entre  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  y  $\rho_4$  .

Para un corte geoeléctrico de 5 capas existen 16 posibles combinaciones entre  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  y  $\rho_4, \rho_5$  y, por lo tanto, hay 16 tipos de curvas de sondeo eléctrico de 5 capas, cada uno de estos tipos de

combinaciones o cortes geoeléctricos pueden describirse por una combinación de 3 letras. Por ejemplo, un corte HKH es uno en el cual  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$ . En general, un corte de capas donde  $N \geq 3$  se describe por  $n^2$  letras.

Método del Punto Auxiliar y Ajuste de los SEV por Medio de un Programa de Computadora.- Las curvas teóricas precalculadas para subsuelos estratificados, tienen el objetivo de representar la profundidad y la resistividad de cada capa de un sondeo geoeléctrico.

La interpretación cuantitativa de los SEV está basada en la comparación de las curvas de campo con las curvas teóricas que tienen parámetros elegidos adecuadamente. En el caso de perfecta coincidencia de ambas curvas, los valores de los parámetros de campo son los mismos que aquellos del perfil geoeléctrico para lo cual las curvas o gráficas teóricas han sido construidas.

El método del punto auxiliar se basa en la sustitución de varias capas por una sola equivalente, permitiendo el uso de curvas teóricas de menor número de capas que el que presenta el problema.

La curva que desea interpretarse se dibuja en papel bilogarítmico transparente del mismo módulo que el utilizado para las curvas patrón. En la gráfica, el eje vertical representa la resistividad aparente ohm-m, y el eje horizontal, la separación elec-

tródica AB/2 en metros cuando el dispositivo empleado es el --- Schlumberger; para el caso Wenner, en el eje horizontal se asignan los valores de la separación electródica.

El método exige conocer previamente el tipo de curva que se trate ya sea Q, K, A, H o una combinación de ellas, de acuerdo a su -- forma.

Para la interpretación de las curvas de campo el proceso es el -- siguiente:

- a) Identifíquese la curva de campo como del tipo H, K, Q ó A, - según su forma.
- b) Se hace coincidir la parte izquierda de la curva de campo con una curva patrón de tres capas (Figura 13 ).

La posición de la "primera cruz" (origen de coordenadas; punto  $E_1 = 1$  y  $\rho_1 = 1$  de las curvas patrón) y las dos marcas de resistividad - (que señalan en el eje vertical de las curvas patrón, el valor de  $\rho_2$  y una estimación de  $\rho_3$ ) deben colocarse sobre el papel transparente que contiene la curva de campo. Debe anotarse también el - valor de  $E_2/E_1$  que identifica la curva patrón. Y partir del va-  
lor de  $E_1$  (leído en el eje horizontal de la curva de campo, de -- acuerdo con la posición de la "primera cruz") se obtiene una esti-  
mación de  $E_2$ .

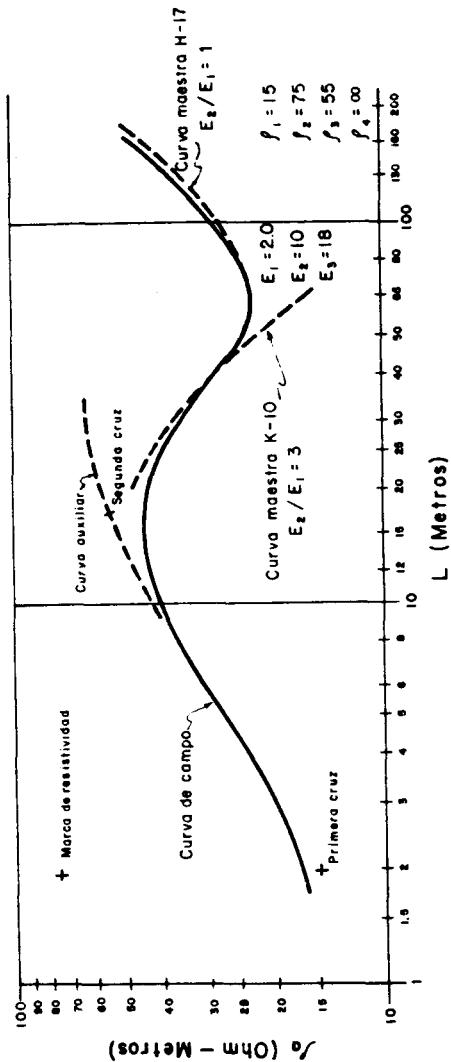


Figura 13 Interpretación de una curva HK por medio de curvas patrón de tres capas, utilizando el método del punto auxiliar.

La selección de la curva de 3 capas más adecuada puede facilitarse por ajuste previo con las curvas patrón de 2 capas.

c) Se superpone el papel transparente de la curva de campo sobre el diagrama auxiliar correspondiente al tipo de curva. Deben conservarse paralelos los ejes correspondientes a cada lámina en todo el proceso.

Para las curvas H y Q se coloca la "primera cruz" sobre el origen de coordenadas del diagrama auxiliar.

Para las curvas A y K se coloca la "primera cruz" sobre el eje vertical de la izquierda del diagrama auxiliar, en la posición correspondiente al valor de la relación  $\rho_2/\rho_1$  de la familia de curvas patrón.

Y debe trazarse, en el papel transparente que contiene la curva de campo, la curva auxiliar correspondiente que tiene como origen la "primera cruz".

d) Conservando la cruz origen de coordenadas de la lámina patrón, sobre el trazo de la curva auxiliar del paso c, y manteniendo el paralelismo entre las láminas, se hace coincidir alguna curva patrón con la parte derecha de la curva de campo.

Cálquese la posición de la cruz origen de coordenadas de la lámina patrón utilizada, que será llamada "segunda cruz", y las dos -

marcas de resistividad sobre el papel transparente de la curva de campo. Las marcas de resistividad indican el valor de  $\rho_3$  y  $\rho_4$ . El valor de  $\rho_3$  debe aproximarse al valor de  $\rho_3$  estimado en el paso b. Anótese la relación de espesores que define la curva patrón. Esta relación de espesores se expresa como  $E_3/E_2$ . En el paso f se determinará  $E_2$ .

e) Se superpone nuevamente la curva de campo sobre el gráfico auxiliar, en la misma posición que cuando se calcó la curva auxiliar en el paso c. La "segunda cruz" quedará ahora sobre una de las líneas de trazos del gráfico auxiliar. El número índice de éstas líneas es igual a la relación  $E_2/E_1$ . A partir del valor leído para  $E_1$ , en la gráfica de campo se calcula  $E_2$  que debe ser un valor aproximado al calculado en el paso b.

f) Léase en el eje horizontal el valor correspondiente para la "segunda cruz" (de la misma manera que el valor de  $E_1$  para la "primera cruz"), el cual será igual a  $E_2$  y teniendo en cuenta el valor de la relación  $E_3/E_2$  del punto d, se calcula el valor de  $E_3$ .

Mediante este proceso es posible efectuar interpretaciones de - curvas 4,5 ó más capas, pero la exactitud disminuye rápidamente (Deppermann et al 1961 y Homilius 1961).

Una vez obtenido el modelo de resistividades y profundidades a través de la solución del problema inverso, es posible aplicar un programa de computadora que resuelve el problema directo. Esto es, dado el corte geoeléctrico se obtiene la curva del SEV -- que produce dicho corte. Para ello, la computadora es alimentada con las resistividades reales obtenidas, el número de estratos y las profundidades a las inter-fases. Con base en estos datos el programa ejecuta la construcción de la curva teórica que, dependiendo de la calidad de la interpretación, deberá aproximarse a la curva de campo.

La comparación entre las dos curvas proporciona un índice del ajuste del modelo calculado y la curva obtenida durante la ejecución del SEV. Sin embargo, es importante hacer notar que la solución del problema inverso no es única, lo que significa que una curva puede ser satisfecha por varios modelos o cortes electroestratigráficos.

En la Figura 14 , se presentan dos curvas de campo con los datos obtenidos en su interpretación, los cuales fueron alimentados a la computadora para reproducir la curva de SEV, mostrando una clara coincidencia entre ambas.

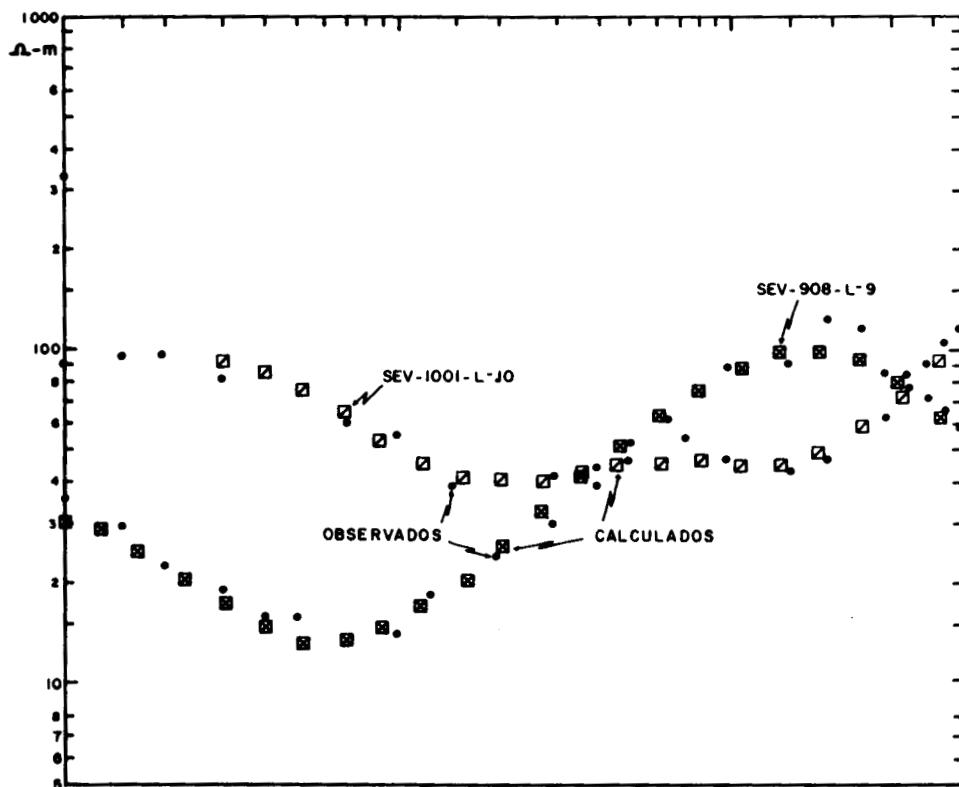
Este procedimiento aplicado a todos los SEV permitió la obtención de datos confiables con los que se elaboraron perfiles electroes-

## SONDEO ELECTRICO

CAMPO Cerro Prieto, B.C.  
 LINEA L-9 y L-10  
 NUMERO 908 y 1001

FECHA \_\_\_\_\_  
 OPERADOR \_\_\_\_\_

OBSERVACIONES \_\_\_\_\_



	VALOR DE RESISTIVIDAD INTERPRETADO			PROFUNDIDAD DE INTERFASES		
908	1.12	30.0			2.4	
1001	10.0	3.63	7.5	1.8	82.5	
	10 2 3 4 5 100	2 3 4 5 1000	2 3 4 5 10000	2 3 4 5 100000	2 3 4 5 1000000	m

ESPACIAMIENTO DE ELECTRODOS  $AB/2$ , Y PROFUNDIDAD EN METROS

Figura 14 Curvas de SEV 908 y 1001, ubicadas en las líneas 9 y 10, al SE el campo geotérmico. Se muestra el modelo interpretado y el calculado con computadora.

tratigráficos y planos de Resistividades del Estrato de Conductivo y de Discontinuidades Eléctricas.

EXPLORACION GEOTERMICA EN EL VALLE DE MEXICALI,  
REPUBLICA MEXICANA

Localización, Clima y Topografía.- La zona de estudio se localiza en el Valle de Mexicali al noroeste de la República Mexicana, en el extremo NE de la Península de Baja California, entre los meridianos 115° y 116° de longitud oeste y los paralelos 32° y 33° de latitud norte (Figura 15) ; limitada al sur por el Golfo de California y al oeste por la Sierra de Cucapa.

En la parte centro-oeste del Valle de Mexicali se encuentra la prominencia volcánica de Cerro Prieto que es una extrusión lávica compuesta por un volcán y un domo que da nombre a la zona de manifestaciones termales, en donde la Comisión Federal de Electricidad ha enfocado sus esfuerzos para la obtención de vapor del subsuelo utilizable en la generación de energía eléctrica.

La región se caracteriza por un clima árido, sumamente caliente en el verano y frío en el invierno y por una topografía plana y homogénea en el valle.

La constitución de los suelos y un sistema de irrigación constan

te por medio de una red de canales, ha convertido al valle en una de las regiones agrícolas más productoras del país, con cultivos de algodón, trigo, alfalfa, sorgo, etc. Fuera del área de riego la vegetación está representada por plantas enanas de raíces profundas, como el huizache, la gobernadora, la cachanilla y otras - de variedad espinosa (xerofitas).

En la zona geotérmica predominan terrenos pantanosos, cuyas aguas aparentemente provienen de una serie de manifestaciones termales y de algunas descargas de los drenes provenientes de la parte este del valle. La actividad geotérmica se manifiesta en numerosos volcanes de lodo, fumarolas y manantiales de agua caliente.

Geología.- La geología de la región está representada por una plaine aluvial constituida básicamente por depósitos deltáicos provenientes del Río Colorado (formados por arcillas, limos, arenas, gravas, lutitas y areniscas), que sobreyacen a rocas ígneas intrusivas (granitos) y posiblemente a rocas metamórficas (gneisses y esquistos) como los que afloran en las Sierras Cucapa y Juárez.

Los granitos en algunos sitios intrusionan calizas del Cretácico, por lo que se les ha asignado una edad del Cretácico Superior. En la región occidental del Valle de Mexicali existen depósitos de piedemonte provenientes de la Sierra de Cucapa que consisten principalmente de arenas y gravas, (Ver Plano).

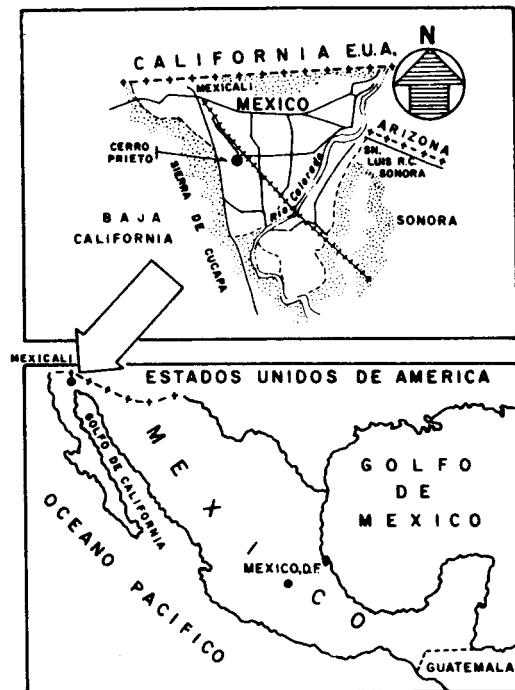


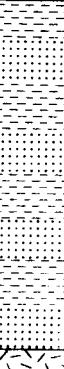
Figura 15 Localización del Área de Estudio

En el área del campo geotérmico de Cerro Prieto, existe una alteración de lutitas y areniscas de aproximadamente 2,000 m de espesor que descansa discordantemente sobre el basamento granítico. Sobreyaciendo a esta serie clástica se encuentran otros depósitos sedimentarios no consolidados constituidos por arcillas, limos, arenas y gravas cuyo espesor varía desde pocos metros hasta 2,500 m. (Figura 16 ).

La única prominencia del Valle de Mexicali, corresponde al volcán de Cerro Prieto, que es de composición riodacítica y se le ha asignado una edad de 700,000 años (Pleistoceno).

Tectónicamente el área de estudio se localiza dentro del sistema denominado San Andrés (Figura 17), dentro del cual se encuentran las fallas de Cerro Prieto, Imperial, Cucapa, Michoacán, etc. Algunos autores consideran que este sistema de fallas corresponde a fallas de tipo transforme que se derivan de centros de dispersión de corteza, dada su coincidencia con centros de actividad volcánica reciente, enjambres de temblores, depresiones estructurales y actividad geotérmica. En la figura 18 se muestra un modelo propuesto por Lomnits, Elders y otros (1972), acerca de los centros de dispersión y su relación con fallas transformes.

El sistema de fallas Cerro Prieto, tiene un rumbo general NW-SE, con echaos al oeste y este, similar al de los grandes fallamientos.

	RECIENTE		ABANICOS ALUVIALES DE CUCAPÁ DE ORIGEN GRANITICO Y METASEDIMENTARIO	
C E N O	P L I O  P L E I S T O 	C U A T E R N A R I O	ROCAS RIO DACCITICAS	
Z O I C A	T E R C I A R I O	N O D I F E R E N C I A D O	U-A DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS CONSTITUIDOS POR ARCILLA, ARENAS Y GRAVAS, CON ESPESORES DE 600 A 2500M.	
M E S O Z O I C A	CRETACICO SUPERIOR		U-B LUTITAS INTERESTRATIFICADAS CON ARENIS CAS CONSTITUIDAS DE CUARZO Y FELDESPATOS CEMENTADAS CON CARBONATOS Y SILICE, ESPESOR DE 2000M.	
			U-C ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS CONSTITUIDAS POR GRANITOS GRANODIORITAS, ESQUISTOS, ETC	

Tomada de Puente, 1978

Figura 16. COLUMNAS ESTRATIGRAFICAS DEL VALLE DE MEXICALI B.C.

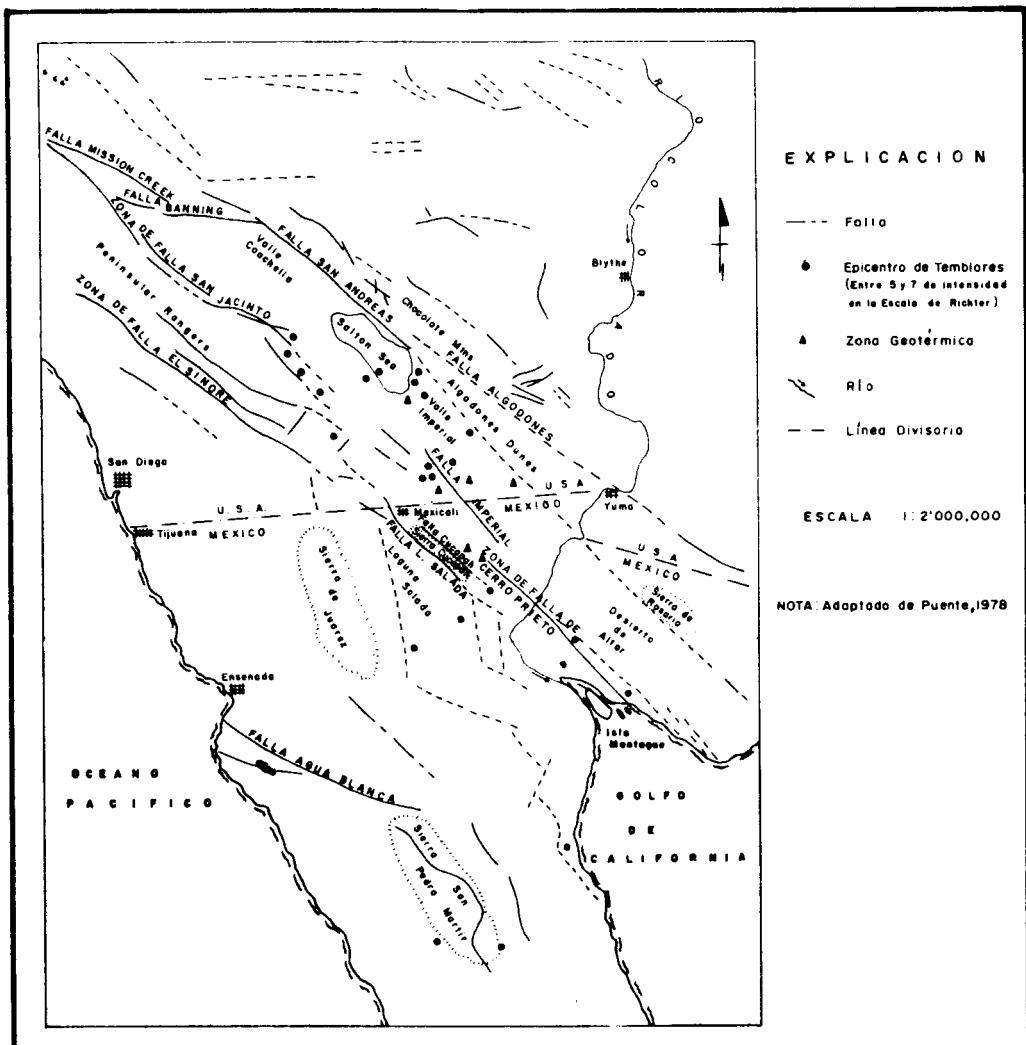
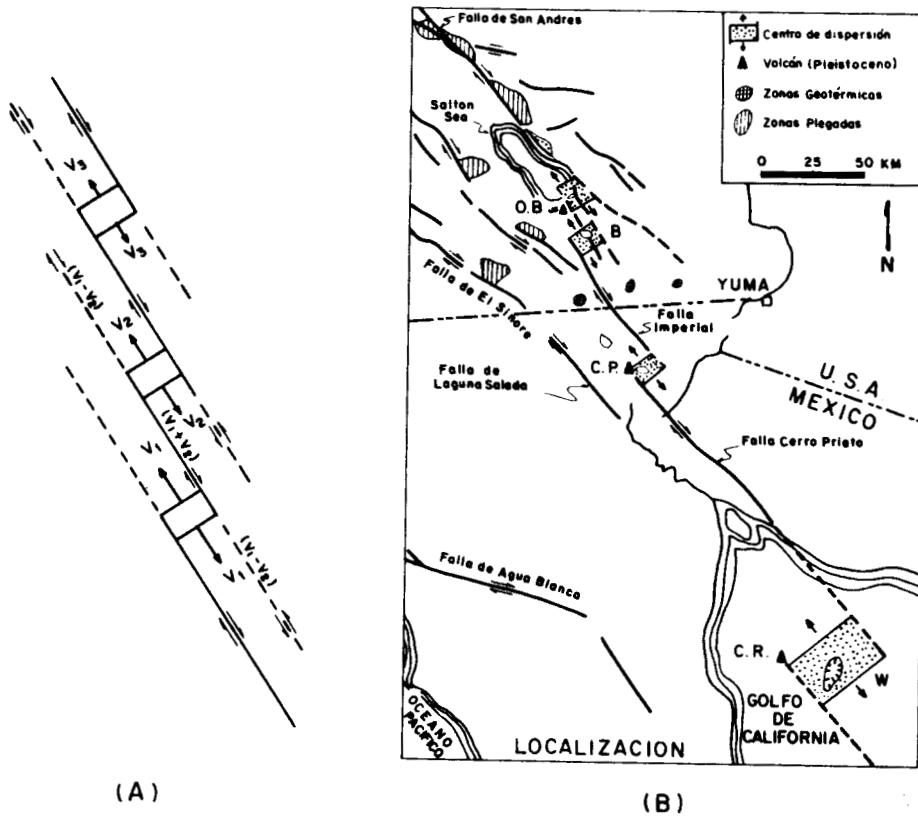


Figura 17. PLANO TECTONICO REGIONAL



(A) Modelo de fallas transformes y centros de dispersión propuesto por Lomnitz et al. (1970) y Elders et al. (1972). (B), localización de éstas fallas y centros en los Valles Imperial y Mexicali

Figura 18. FALLAS TRANSFORMES Y CENTROS DE DISPERSION EN LOS VALLES IMPERIAL Y MEXICALI

tos Imperial, Cucapa, Laguna Salada, Algodones, Elsinore, Mission Greek, San Jacinto, etc. Transversal a este sistema se presenta otro que se conoce como Volcano, con rumbo predominante --NE-SW, localizado en la zona del campo geotérmico de Cerro Prieto.

Estos sistemas de fallamientos han formado en el subsuelo una topografía escalonada, con prominencias estructurales como los --horsts de Cerro Prieto e Imperial y algunas depresiones en forma de grabens.

Debido a que las estructuras geológicas en el Valle de Mexicali están cubiertas por sedimentos deltaicos no consolidados, ha sido necesaria la aplicación de diferentes métodos geofísicos con el fin de conocer las características de los sedimentos y de su basamento granítico o metasedimentario.

En base a la información proporcionada por las perforaciones --efectuadas en el campo de Cerro Prieto, la secuencia estratigráfica se ha dividido en 3 unidades, (figura 16), las cuales se describen a continuación:

UNIDAD A: Se compone de sedimentos deltaicos no consolidados - integrados por arcillas, limos, arenas y gravas, que forman un - cuerpo con cierta plasticidad que les permite ser susceptibles -

de aceptar efectos tectónicos de baja magnitud y que cuando se fracturan, dichas estructuras se rellenan y no permiten el paso de fluidos. La edad de los sedimentos se ha estimado del Cuaternario y su espesor varía de 600 a 2,500 m.

UNIDAD B: Corresponde a sedimentos deltaicos consolidados, -- formados por capas lenticulares de limolitas, lutitas y areniscas, en parte metamorfizadas. Los sedimentos presentan huellas de un fracturamiento, a veces muy intenso, ocasionado por los movimientos tectónicos que han afectado la zona.

Esta unidad presenta permeabilidad primaria y secundaria y, por tal motivo, constituye uno de los acuíferos más importantes del subsuelo. En ella se encuentran los fluidos hidrotermales del campo geotérmico de Cerro Prieto. Su espesor se supone que es de 1,500 m a 2,500 m.

UNIDAD C: Se le ha denominado al basamento granítico y meta-sedimentario. Esta unidad es un cuerpo rígido el cual en forma general presenta un papel muy importante para el comportamiento y mecánica estructural de los sedimentos que le sobreyacen.

La posición estratigráfica de los sedimentos con respecto a las estructuras geológicas, parece indicar que la deposición de - la serie sedimentaria, al menos en algunas partes, ha sido contemporánea con el desplazamiento de las fallas.

Possible Origen de la Actividad Geotérmica en Cerro Prieto.- En la zona geotérmica de Cerro Prieto, por sus características geológicas y por los análisis químicos realizados, se ha supuesto que el calor es proveniente de una intrusión ígnea que ha transmitido la energía termal a las rocas del subsuelo, hasta las que se infiltra el agua y toma el calor que arrastra a zonas permeables cercanas a la superficie.

Se supone que la cámara magmática que está generando la energía calorífica es de origen ácido o intermedio (Alonso H. y Mooser F. 1964), dada la presencia de cristales de azufre en los alrededores de las manifestaciones superficiales y de la gran cantidad de ácido sulfídrico ( $H_2S$ ) que en forma de incondensable aflora con el vapor de los pozos geotérmicos.

Ahora bien, como en dicho vapor también existe un porcentaje elevado de cloruros alcalinos (Mercado S. 1964), se deduce que el agua al infiltrarse realiza un ciclo de convección en el cual durante su ascenso o descenso arrastra cloruros de sodio de las diferentes formaciones que atraviesa. En las cercanías de la zona de alta temperatura se mezcla probablemente con gases calientes del magma, que son los que aportan los componentes ácidos. Son estos mismos gases y agua caliente los que han transmitido a través de varios cientos de años, el calor a una amplia zona, ya que como se sabe las rocas que constituyen la corteza terrestre no --

son buenas conductoras de calor y, por lo tanto, no podría explicarse de otra forma la existencia de grandes zonas calientes.

El vapor generado en el campo, aún cuando tiene temperaturas y -- presiones elevadas, no puede catalogarse como saturado, sino que es una mezcla agua-vapor con alto contenido de sales. La diferencia fundamental entre un yacimiento que produce vapor sobrecaleñado y otro que produce vapor húmedo, estriba en un balance adecuado de la cantidad de energía calorífica, limitado desde luego -- por la cantidad de agua y la permeabilidad de la roca. En un área productora de vapor seco la permeabilidad de la roca es baja y la cantidad de calor es alta; siendo vaporizada inmediatamente el -- agua meteórica que se infiltra. Por el contrario en una zona como Cerro Prieto en la que se tiene una gran permeabilidad, el volúmen de agua meteórica que llega a la zona caliente es mayor que el que ésta puede vaporizar. El resultado es la obtención de un yacimiento que al explotarse produce en superficie una mezcla de agua-vapor, la cual se tiene que separar antes de ser aprovechada en la generación de electricidad.

Antecedentes Técnicos.- Los estudios encaminados para fines geotérmicos en el Valle de Mexicali y específicamente en el área del actual campo geotérmico de Cerro Prieto, se iniciaron en el año -- de 1959, con levantamientos fotogeológicos y geológicos superficie

les. Posteriormente y hasta el año de 1961 se perforaron tres pozos (1A, 2 y 2A) a profundidades de 523 m, 755 m y 402 m, de los cuales únicamente el primero resultó productor.

A partir de 1962 a 1968, se efectuaron levantamientos sismológicos; gravimétricos y un estudio geoquímico que permitieron la localización de cuatro pozos exploratorios profundos, de los cuales tres resultaron productores (M-3, M-5 y M-6) y el cuarto (M-4), es téril. Posteriormente en esa área se perforaron 15 pozos más para suministrar vapor a la primera planta geotermoelectrica del país con capacidad de 75 MW que fué inaugurada en 1973.

Entre 1968 y 1970 se efectuó un estudio geohidrológico por medio del análisis de isótopos estables de oxígeno, carbón e hidrógeno.

En el año de 1971, se efectuó un levantamiento aeromagnético regional y se inició en 1972 el primer estudio geoeléctrico en el -valle de Mexicali y campo geotérmico de Cerro Prieto.

Con el fin de determinar la actividad sísmica en el área, su relación con el campo geotérmico de Cerro Prieto y para localizar planos activos de fallas, se inició en 1977 un estudio de sísmica pasiva utilizando siete estaciones localizadas estratégicamente.

Se iniciaron también otros estudios gravimétricos, magnetométricos, un levantamiento de potencial natural y la prospección geoléctrica de la porción Norte del Valle de Mexicali y campo geotérmico -

de Cerro Prieto, B. C., motivo de este trabajo.

Con el resultado de estas investigaciones se ha estado elaborando el modelo geológico del campo.

Trabajo de Campo y Equipo empleado.- En este punto se describirá la secuencia en la ejecución de SEV, en la prospección de la - Porción Norte del Valle de Mexicali y Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B. C., con algunos problemas típicos en el desarrollo de éstos, así como el equipo y material empleados.

El procedimiento que en general se siguió para la ejecución de - cada SEV fue el siguiente: en la baja de registro (Figura 18 ) se anotaron datos como el número de sondeo, el área a que corresponde, el número de línea, la fecha y algunas observaciones de localización o problemas que se presentaron en su ejecución.

La técnica de SEV utilizada, fué el arreglo tetraelectródico -- Schlumberger, en el cual los electrodos M y N permanecen fijos - (simétricamente colocados respecto al centro del sondeo) y se van efectuando lecturas de la diferencia de potencial  $\Delta V$  y de la corriente I, para una separación de electrodos AB sucesivamente - creciente según una progresión geométrica, como se puede observar en la hoja de registro. A medida que se aumenta la distancia AB, el valor de  $\Delta V$  disminuye y cuando se hace demasiado pequeño - se cambia la distancia MN por otra mayor. Esta operación se deno

## SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES

139

## SONDEO ELECTRICO

CAMPO Cerro Prieto B.C.FECHA 22-02-78LINEA L-12OPERADOR J.R.B.NUMERO 139

OBSERVACIONES \_\_\_\_\_

AB / 2 METROS	MN/2 METROS	K CONSTANTE	I Amperes CORRIENTE	Δ V m Volts POTENCIA	ρ Ohm-m RESISTIVIDAD	
10	2.5	58.9	19.8	135	.40	
15	2.5	137.4	17.4	63	.50	
20	2.5	247.4	18.6	40	.83	
30	2.5	561.6	16.4	16	.82	
40	2.5	1000.5	18.4	12.5	.68	
50	2.5	1566.8	20	8.8	.69	
	10	377.0	20	32	.60	
70	2.5	3074.8	19.6	4.7	.74	
	10	754.0	20	17.6	.67	
100	2.5	6279	19.8	2.72	.86	
	10	1555.1	19.2	10	.81	
150	10	3518.5	19.2	4	.73	
	10	6267.4	18.4	2.1	.71	
200	40	1508	18.6	8.5	.69	
	10	14121.4	18.6	1	.76	
300	40	3471.4	1.6	3.5	.76	
	10	25117	19	.64	.85	
400	40	6220.3	19	2.5	.82	
	40	9754.6	Problemas de contacto terreno demasiado conductorivo.			
500	100	3778				
	40	22026.4	20	.92	1.01	
750	100	8678.6	20	2.37	1.03	
	150	5684.8				
1000	40	39.207	6.3	.16	1.12	
	100	15550	6.3	.46	1.13	
	250	5890	6.3	1.23	1.15	
1500	100	35165.8	4.3	.17	1.39	
	250	13744.4	3.1	.34	1.51	
	500	6283.19	3.1	.76	1.54	
2000	100	62674	4.1	.11	1.68	
	250	24740.1	4	.32	1.96	
	500	11761	3.7	.64	2.04	
2500	250	38877.2	4.2	.27	2.50	
	500	18849.6	4.2	.57	2.56	
3000	250	56156	3.6	.21	3.28	
	500	27489	3.6	.43	3.28	
3500	500	37639.2	3.8	.39	3.87	
4000	500	49480	3.9	.38	4.82	
4500	500	62832	4.6	.40	5.46	
5000	500	77754	4.2	.34	6.29	

Figura 19. Registro de SEV

## SONDEO ELECTRICO

CAMPO Cerro Prieto B.C.FECHA 25-03-78LINEA L-10OPERADOR J.R.B.NUMERO 1009

OBSERVACIONES \_\_\_\_\_

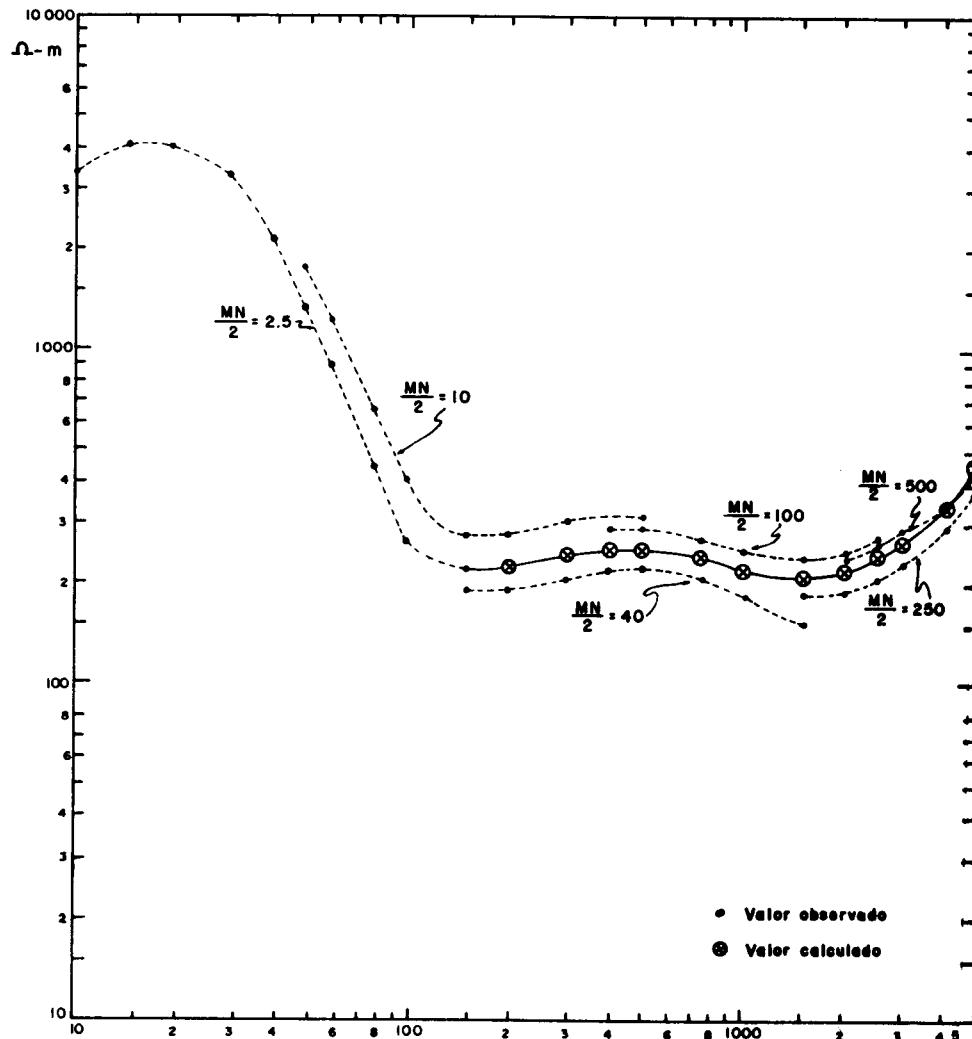


Figura 20. Efectos de empalme de un SEV tipo Schlumberger.

mina "empalme" y ha de realizarse de modo que las últimas lecturas con el MN pequeño, se repitan con el nuevo MN y las mismas AB.

En la Figura 14, se muestran los efectos de "empalme", que son reflejo de la inhomogeneidad del terreno involucrado para los diferentes espaciamientos de MN. Para su eliminación deberá calcularse el factor de desplazamiento, por medio de una sencilla relación matemática entre el valor menor de MN y el mayor, o hacerse una corrección en forma gráfica, para obtener una curva continua que se utiliza en los diferentes procesos de interpretación.

En el trabajo de campo las distancias entre electrodos para las diferentes lecturas deberán de ser revisadas periódicamente, ya que al no existir simetría en el arreglo se "crean" valores anormales en la curva. Por lo que la curva deberá irse trazando a la par del levantamiento, para estar seguros de la buena calidad de los datos y de no ser así repetir las lecturas hasta lograr una curva aceptable y en caso contrario localizar la fuente de error y eliminarla.

Existe un problema común en cuanto a la introducción de la corriente eléctrica al terreno, éste es la resistencia de contacto, la cual puede vencerse incrementando el voltaje de salida del equipo-transmisor, aumentando el número de electrodos o saturando la superficie del terreno con una solución salina.

En el caso del sistema de recepción, es recomendable el uso de - electrodos de cobre y cable del mismo material para minimizar los problemas de polarización.

El efecto de fugas de corriente en los cables de emisión se presenta con frecuencia y se refleja en cambios bruscos en la curva, - por lo cual se recomienda mantener en buen estado el cable y más aún si se trabaja en terrenos húmedos. Asimismo, debe tenerse especial cuidado en el aislamiento de los instrumentos de medición respecto al terreno.

El instrumental empleado en el levantamiento del Valle de Mexicali consistió del siguiente material y equipo. Un equipo Scintrex IPC/15 de 15 Kw de potencia, como instrumento de emisión; para la recepción se utilizó un Voltímetro de alta impedancia Mca. Hewlett Packard, modelo 419-A y un eliminador de potencial espontáneo (compensador) con rango de 1mV a 1,500 mV.

Dentro de los accesorios para los sistemas de emisión y recepción, se utilizaron cables tipo Flexanel (cobre y acero) de calibres 10 y 16, carretes para transportar dicho cable, electrodos de fierro y cobre, marros, cinta aislante y materiales menores. Para el --- transporte de equipo y personal se emplearon vehículos tipo Pickup, con radio transreceptor de banda FM como sistema de comunicación.

Análisis de Perfiles y Planos de Iso-resistividad Aparente.- Una forma de analizar las variaciones de la resistividad a profundidad y lateralmente, se presenta con la elaboración de perfiles - de iso-resistividades aparentes. En éstos, los sondeos se sitúan sobre el eje de coordenadas X, y los valores de las resistividades aparentes directamente debajo de cada sondeo a una distancia igual al espaciamiento AB/2 utilizado en su cálculo.

Para el estudio del comportamiento eléctrico del campo geotérmico de Cerro Prieto y la porción norte del Valle de Mexicali, se elaboraron 11 perfiles (Planos Nos. 2 y 3). En ellos son notables varios bajos resistivos, menores de 2 ohm-m, que en algunos casos pueden corresponder a zonas de interés geotérmico, y en otros representar zonas de mayor porosidad por fracturamiento o cambios de facies, o de alto contenido salino.

Los valores de resistividad que se presentan en los perfiles son de 1 a 30 ohm-m y en general tienen la tendencia a incrementarse del suroeste al noreste.

Los 11 perfiles permiten visualizar el comportamiento eléctrico de las diferentes áreas y localizar zonas de mínimos resistivos, cuyos límites se aprecian de una manera objetiva y parecen tener cierta relación con el comportamiento estructural del subsuelo y las zonas de mayor salinidad.

Para complementar el análisis de los perfiles de iso-resistividades aparentes, se construyeron 5 planos (no se presentan), con las configuraciones de las resistividades para espaciamientos de AB/2 iguales a 1000, 2000, 3000, 4000 y 5000 m. Al igual que lo observado en los perfiles, en estos planos se aprecia una clara relación entre condiciones geológico-estructurales y las áreas de mayor salinidad con la distribución de las resistividades aparentes.

Dos mínimos de interés, uno relacionado con el actual campo de explotación y otro 15 km al Sur de éste, se enfatizan en todos los niveles, pero el del campo incrementa sus valores de resistividad a profundidad y se reduce en extensión, en tanto que el segundo se mantiene casi con la misma amplitud. Cabe mencionar que la reducción en extensión del mínimo del campo, que se observa -- conforme se profundiza el sondeo, se debe al efecto de la salinidad que provoca la laguna de evaporación, las manifestaciones - - termales existentes y la cercanía de los abanicos aluviales con - alta porosidad. Este mínimo que se observa en la configuración - para AB/2 igual a 1000m, presenta una íntima correspondencia con el horst de Cerro Prieto y falla Pátzcuaro.

El mínimo de la zona sur, parece estar relacionado en su forma con las condiciones geológico-estructurales del subsuelo, y en su extensión con la existencia de una mayor salinidad, en forma simi--

lar a la observada en el área del campo geotérmico, pero con la diferencia de que al noroeste su límite no está definido por alguna estructura y al sureste parece tener una mayor extensión.

Otro mínimo resistivo aparece en los planos que corresponden a - espaciamientos de AB/2 igual a 4000 y 5000 m, y sus valores están en el orden de 2 a 3 ohm-m. Este mínimo se localiza en la línea 1 a 3.5 km al NE, de la vía, y se infiere que está relacionado con una falla secundaria del sistema Cerro Prieto.

#### INTERPRETACION GEOLOGICA-GEOFISICA

Secuencia Electroestratigráfica y su Relación con la Estratigrafía.- En el Valle de Mexicali, por las características propias - de depósito y las condiciones geológico estructurales, la secuencia estratigráfica no es constante, por lo que presenta variaciones laterales y verticales. Este comportamiento dificulta la corrección de los valores de resistividad calculados por medio de los SEV, ya que éstos se ven afectados por los cambios laterales. En los perfiles electroestratigráficos que se muestran en los planos Nos. 4 y 5 se presentan las evidencias de esas variaciones.

Los perfiles electroestratigráficos que presentan la secuencia -- eléctrica de la resistividad en el subsuelo, reflejan las condi-

ciones combinadas de ciertos factores, tales como el tipo de dé pósito, tectónica y en el caso del Valle de Mexicali la salinidad y actividad geotérmica.

Un análisis del comportamiento geológico-estructural del Valle de Mexicali y su relación con la actividad geotérmica, considera en algunas zonas que los sistemas de fallas (Cerro Prieto, Pátzcuaro y otros) son los principales rasgos que controlan el movimiento de fluidos termales hacia los estratos permeables. Relacionado a ésto se presenta la actividad del metamorfismo hidrotermal, a causa del cual la cementación de los sedimentos no consolidados - reduce su porosidad y aumenta su densidad. Este efecto provoca un incremento en la resistividad de las formaciones al sellar algunas fracturas en diferentes formas y en distintas zonas del ya cimiento.

La consolidación puede deberse a: compactación en una cuenca de sedimentación; cementación por calcita, cuarzo, adularia y pirita; y por metamorfismo que involucra reacciones de deshidratación y descarbonatación en las que se forman nuevos minerales.

El comportamiento eléctrico de los sedimentos con alto contenido salino en el Valle de Mexicali define la existencia de una capa conductiva que sobreyace a otra resistiva, que impide la detección de zonas de baja resistividad a profundidad relacionadas con

fluídos termales.

Los perfiles electroestratigráficos permiten diferenciar en forma general 3 horizontes o estratos con diferente comportamiento eléctrico, que de acuerdo con la geología superficial y del subsuelo, los dos primeros se pueden correlacionar con los depósitos aluviales que están constituidos por arcillas, limos, arenas y gravas. A este paquete superficial se le ha denominado unidad A y corresponde a los sedimentos no consolidados. Subyaciendo a éstos se presentan lutitas y areniscas que constituyen los sedimentos consolidados denominados unidad B, que en general presentan alta resistividad (Figura 16) y se han relacionado con el tercer estrato detectado en los perfiles electroestratigráficos.

Dentro de los sistemas de afallamientos que afectan al valle, parece ser que la falla de Cerro Prieto es la que influye notablemente en la distribución de las resistividades, quizá por la relación que podría tener con la génesis de la actividad geotérmica en el campo de Cerro Prieto (Planos Nos. 4 y 5).

En la parte superior de la secuencia electroestratigráfica el primer horizonte que se determinó está constituido por varias capas de pequeños espesores que presentan gran variedad en los valores de resistividad, que van de menos de 1 ohm-m, en el área de laguna de evaporación, abanicos aluviales y zona de manifestaciones -

termales, hasta valores de 30 ohm-m. Sus espesores fluctúan desde pocas decenas de metros a 300m, en la parte SW de cada una de las líneas, con incrementos hacia el extremo NE donde alcanzan profundidades de 2500 m y presentan las más altas resistividades. - Este horizonte se ha interpretado como la parte más superficial - de la cubierta de arcillas, limos, arenas y gravas de origen deltaico (sedimentos no consolidados), con agua de diferente contenido salino, en el que la falla Cerro Prieto actúa como una frontera en su comportamiento hidrológico que se refleja en la diferencia de los valores de resistividad en sus bloques.

Subyaciendo al horizonte superficial, se encuentra el segundo estrato electroestratigráfico, que por los bajos valores que tiene se ha denominado estrato conductor, el cual se ha relacionado -- también con la parte más profunda de los sedimentos no consolidados. En él se presentan espesores entre 300m y 2000m., llegando a alcanzar en algunas zonas al E de la falla de Cerro Prieto hasta 3200 m. En el extremo NE de las líneas Nos. 2 y 3 no fué posible delimitar el espesor de este horizonte, por lo cual se infiere un incremento de los sedimentos hacia el SE, del campo geotérmico de Cerro Prieto. Los valores de resistividad son menores de - 1 ohm-m a 15 ohm-m, siendo claramente observable el incremento de resistividad en la dirección NE, suponiéndose relacionado con el flujo de la recarga hidráulica y la falla Cerro Prieto.

El horizonte resistivo profundo que subyace al conductivo parece tener relación con los sedimentos consolidados (lutitas y areniscas de la unidad B) como se muestra en el plano No. 6. En este estrato las resistividades dominantes van de 20 ohm-m a 150 ohm-m, y su espesor no fué posible determinarlo.

Como se comentó en el párrafo anterior, el incremento de los sedimentos no consolidados hacia SE impidió la determinación del espesor del horizonte conductor y por ende la detección del estrato resistivo profundo, ya que su cima es la base del estrato conductor.

En el plano No. 6 se muestran cinco secciones geológicas en las que se presentan los resultados de algunos SEV, correlacionados con las unidades A y B determinadas con perforaciones, en las que se indican las zonas de producción del campo de Cerro Prieto.

El análisis de estas secciones permite observar cierta correspondencia entre el contacto de las unidades A y B con la cima del estrato resistivo profundo. Las discrepancias entre éstos se deben básicamente, como se comentó en párrafos anteriores, al efecto de la capa superficial conductiva, los procesos de cementación de los sedimentos no consolidados y las inhomogeneidades laterales del depósito.

En las mismas secciones se observa que la falla de Cerro Prieto y otras zonas fracturadas, presentan clara correspondencia con los datos de resistividad y que la zona de producción somera en el -- campo está relacionada con valores bajos dentro del estrato resistivo profundo debido quizá al fracturamiento que permite el - ascenso de fluidos hidrotermales a regiones someras. Por otro lado, en la parte E del campo, donde se encuentra la zona de producción profunda, los valores del resistivo son elevados implican do que no existen condiciones de porosidad primaria que permita el paso de fluidos, por lo que la producción de los pozos debe estar relacionada con el fracturamiento secundario al Este de la vía. De dicho análisis, se desprende que no es posible relacionar los datos de resistividad con alguna actividad geotérmica -- profunda, al NE y SE de las fallas Cerro Prieto, Michoacán y -- Pátzcuaro.

Para completar el análisis de los perfiles electroestratigáficos se construyó el plano de iso-resistividades del estrato conductivo (plano No. 7), que en la zona del campo y geotérmico de Ce rro Prieto presenta una anomalía de baja resistividad que tiene cierta correlación con la actividad geotérmica de las rocas que le subyacen. En él se refleja una clara concordancia de los valores menores de 1 ohm-m con la zona del actual campo de explotación, laguna de evaporación y zona de manifestaciones terma-

les. En el también se manifiesta una clara relación entre las estructuras geológicas interpretadas con gravimetría y magnetrímetría (Razo y Fonseca, 1978) y las definidas por geología superficial, perforaciones y otros estudios. En el mismo plano - de conductividad del conductor, se aprecia que una anomalía resistiva con valores mayores de 10 ohm-m, se aloja en la porción sur del horst Imperial y que el incremento de resistividades en general se presenta al NE, estando relacionado con el flujo de la recarga hidráulica proveniente del Río Colorado. En dicho -- plano se presenta otra anomalía de valores menores de 1 ohm-m a 15 km. al sur de la anomalía de Cerro Prieto, en un área en la que no existen manifestaciones termales. Dicha anomalía es interesante para estudios posteriores ya que también está relacionada con la falla Cerro Prieto.

Ahí, el paquete de sedimentos no consolidados parece tener espesores entre los 1400 m y 2300 m, según la interpretación electroestratigráfica. Esta anomalía también puede ser reflejo de ciertas condiciones de porosidad y alta salinidad, como las que se observan en el mínimo del campo de Cerro Prieto.

Discontinuidades Eléctricas y su Correlación Estructural.- En general las variaciones laterales afectan a las curvas de los SEV en forma variable, siendo en las cercanías de las zonas afa-

lladas donde dicho efecto se enfatiza más.

En los perfiles electroestratigraficos (Planos Nos. 4 y 5) se muestran dichos efectos llamados "discontinuidades eléctricas", las cuales son provocadas por el comportamiento geológico-estructural y las características de depósito. Esas discontinuidades pueden corresponder a zonas de debilidad o alta porosidad relacionadas al fracturamiento o cambios de facies, o quizá a un contenido salino variable en las formaciones.

en ellos cambios laterales de resistividad y variaciones notables en su profundidad, llegando en algunos casos (Líneas Nos. 2 y 3 en su parte NE) hasta hacer imposible la detección de la cima del estrato resistivo. Lo anterior parece ser reflejo directo del comportamiento de las fallas en el Valle de Mexicali, que se manifiesta con mayor magnitud en los sedimentos más antiguos y prácticamente no se observa en los estratos próximos a la superficie dentro de los primeros 300 m (Razo A. 1974).

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El método geoeléctrico de SEV puede proporcionar información geológica en muchos casos importantes en la exploración geotérmica.

En el estudio de zonas geotérmicas por medio de sondeos eléctricos verticales, generalmente se considera que la temperatura (el objetivo primordial), cuando llega a ciertos niveles, tiene el efecto de reducir la resistividad de las formaciones, sin embargo, el incremento de la porosidad en la roca y de la salinidad del fluido contenido en ella tienen el mismo efecto.

Por lo anterior, una anomalía de baja resistividad no significa necesariamente un yacimiento geotérmico, aunque un yacimiento geotérmico generalmente dé lugar a un bajo resistivo, por la combinación de los diversos factores de porosidad, salinidad y temperatura que los caracterizan.

La correlación del estudio de resistividad con la geología superficial e interpretación gravimétrica y magnética del valle de Mexicali y campo geotérmico de Cerro Prieto, permite afirmar que regionalmente las anomalías de baja y alta resistividad tienen -- alguna relación con los grandes afallamientos del subsuelo.

El análisis de las configuraciones de resistividades aparentes y calculadas y la información obtenida mediante perforaciones, señala cierta correspondencia de dichas anomalías con estructuras de horts, grabens o afallamientos de tipo escalonado (en echelón).

Dentro de las conclusiones importantes de la exploración realizada, destaca la detección de dos anomalías de baja resistividad, - una en el área del actual campo geotérmico en explotación, ubicada entre las líneas números 1 y 7, y otra localizada 15 Km al SE del campo geotérmico, situada entre las líneas números 10 y 11 - (plano No. 7). La primera en el horst denominado de Cerro Prieto y la segunda en el bloque suroccidental de la falla Cerro Prieto.

En relación a la anomalía del campo geotérmico, la correlación - de la secuencia electroestratigráfica con la secuencia geológica obtenida mediante perforaciones, indica que la serie arenoso arcilloso comprendida en la unidad A, que constituye el sello impermeable del campo, se comporta como un horizonte conductivo (de -

baja resistividad), y los componentes de la unidad B (areniscas y lutitas) que sobreyacen, como un cuerpo resistivo.

La misma correlación señala que las altas temperaturas en el suelo se localizan en el horizonte resistivo (plano No. 6), dentro del cual las resistividades varían entre 20 y 150 ohm-m.

El análisis de las resistividades en el horizonte resistivo no - permite establecer una relación directa entre ellas y las zonas- termales, ya que no es posible definir un contraste entre las re- sistividades observadas dentro y fuera del campo, sin embargo, es evidente que a pesar de ésto, existe un reflejo de la actividad- termal en las propiedades eléctricas de las rocas que los sobre- yacen y que se manifiesta como una zona de baja resistividad - - (Plano No. 7).

En relación con la anomalía de baja resistividad localizada al- SE del campo de Cerro Prieto, cabe mencionar que corresponde a una zona en la que no existen evidencias superficiales de termá lidad y donde la serie sedimentaria constituida por arenas y ar cillas parece tener un espesor aproximado de 1400 a 2300 m. de acuerdo con la interpretación electroestratigráfica.

La anomalía del SE podría corresponder a factores de porosidad- y salinidad propios de las condiciones de depósito de los sedi- mentos.

Ambas anomalías en alguna forma están relacionadas con la falla de Cerro Prieto, y si ésta ha dado lugar a dicho campo, la segunda anomalía, por sus características, señala una amplia zona de interés para ser explorada a detalle y evaluar su importancia.

Si bien en la interpretación electroestratigrafica del campo geotérmico se señala que la zona productora se encuentra en el estrato denominado resistivo, ésto no implica que en ciertos casos, como la anomalía del SE, de existir alguna actividad geotérmica, ésta se pudiese encontrar en el conductivo.

Por lo que respecta al horst Imperial, las características eléctricas del subsuelo no señalan en él anomalías de baja resistividad de importancia al menos superficialmente. Ya que en el área -- del Ejido Tamaulipas se presentan varios pequeños mínimos de - - 2 ohm-m en el estrato conductor, que en relación a los también valores bajos de resistividad que los circundan, es muy aventurado darles alguna interpretación geotérmica.

Un alto resistivo que se localiza al NW de Cerro Prieto, se ha - asociado precisamente con un gran horst interpretado con gravimetría. En él, el estrato conductor tiene aproximadamente el - mismo espesor que en el campo geotérmico, y sus resistividades - así como las del estrato que le subyace, no manifiestan alguna-- anomalía que se pudiese interpretar desde el punto de vista eléctrico.

trico como de interés para la exploración geotérmica.

Prácticamente en todas las configuraciones y perfiles se ha señalado un alto resistivo entre los Ejidos Guerrero, Toluca y Tlaxcala, situados al este del campo geotérmico de Cerro Prieto, dentro o al menos cerca de lo que podría ser la prolongación SE del horst Imperial.

De acuerdo a los resultados anteriores es recomendable la aplicación de ciertos métodos, tales como el Magnetotelúrico y el Telúrico como un complemento útil para los levantamientos de resistividad (SEV), ya que estos proporcionan un medio para verificar las interpretaciones de los SEV.

En el área de Cerro Prieto el método Magnetotelúrico, proporcionaría también un medio para resolver la estructura más profunda que está enmascarada por las capas de baja resistividad cercanas a la superficie.

La aplicación del método Dipolo-Dipolo en la exploración geofísica, tiene la ventaja de permitir el levantamiento de grandes áreas en menor tiempo que el que toman otros arreglos electródicos, además que el método permite la detección de zonas a mayor profundidad. En el caso de Cerro Prieto es posible su utilización en combinación con los sondeos eléctricos verticales, ya que la interpretación de los datos de Dipolo-Dipolo se puede - -

hacer con la ayuda de las curvas patrón utilizadas para los SEV, siempre y cuando en el método de dipolo se utilicen las variantes de Dipolo-Ecuatorial o Dipolo Azimutal.

Los resultados obtenidos por medio de un estudio de Sísmica de - Reflexión, han sido de gran ayuda desde el punto de vista estructural y estratigráfico, por lo que la aplicación de este método en combinación con la gravimetría y magnetometría es recomendable.

Una vez definidas las zonas de interés geotérmico por medio de las anomalías de baja resistividad, es conveniente mapear las zonas - de flujo calorífico desarrollando un programa de termometría a -- profundidades comprendidas entre 100 m y 200 m.

Presente y Futuro del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B. C.-La Comisión Federal de Electricidad inició la exploración del campo geotérmico de Cerro Prieto en el año de 1959. En 1960 y 1961 - se efectuaron 2 pozos someros en los que se registraron temperaturas bajas. En el año 1962 y 63 se llevaron a cabo estudios -- geológicos, geoquímicos y geofísicos de detalle, para en 1964 -- ejecutar las primeras perforaciones profundas, con las que se -- estableció como una realidad el poder explotarlo comercialmente. A partir de esta fecha se inició un programa de estudios y per--foraciones que culminó con la construcción de la primera planta

generadora de electricidad con capacidad de 75,000 KW, que entró en operación en 1973. Esta planta consta de 2 turbogeneradores- con capacidad de 37.5 KW cada uno y es abastecida por vapor proveniente de 18 pozos perforados en una superficie de 1 km<sup>2</sup>, con profundidades de producción entre 1,100 m y 1,500 m. La presión de entrada a las turbinas es de 5.27 Kg/cm<sup>2</sup> y en el año de 1977-operó con un factor de planta de 90.3%. En abril de 1979 se pusieron en marcha las unidades 3 y 4 produciendo 75,000 KW más.

Las exploraciones y perforaciones en el campo de Cerro Prieto - han continuado y a la fecha, de acuerdo a los pozos exploratorios se tiene determinada la existencia de un yacimiento con ca pacidad suficiente para generar 400,000 KW, y se espera en un futuro próximo, con los nuevos trabajos que se están desarrollan do, poder comprobar un potencial mucho mayor.

Dentro del programa de CFE, se encuentra la instalación de una -- planta de 30,000 KW adicionales, que se pondrán en marcha en -- 1981 aprovechando el vapor de baja presión que se obtendrá del -- agua separada de los pozos conectados a las unidades 1, 2, 3 y 4 y que actualmente se descarga a una laguna de evaporación. Otra planta (Cerro Prieto II) iniciará su primera etapa de generación con 55,000 KW en 1983 y 55,000 en 1984 y una segunda etapa de -- 110,000 KW en 1985.

Si los resultados de las exploraciones durante los próximos 2 años son positivos, se tiene pensado que la capacidad que se podrá instalar en los 2 años siguientes será de 400,000 KW, con lo cual para 1987 ó 1988 se tendrán plantas con una capacidad del orden de - los 800,000 KW.

## B I B L I O G R A F I A

Alonso, E. H., 1978. El Desarrollo del Campo Geotérmico de Cerro Prieto en Mexicali, B. C. Publicación Interna C.F.E.

Araña, S.V. y López R. J. 1974.-Vulcanismo, Dinámica y Petrología de sus Productos Ed. Istmo, Madrid.

Arellano, F. y Razo A., Julio/1978.-Prospección Eléctrica en la Porción Norte del Valle de Mexicali y Campo Geotérmico de Cerro -- Prieto, B. C. Publicación Interna, C.F.E.

Argelo, S. M., 1977.-Computers Programs for the Calculation for -- Standard Graphs for Resistivity Prospecting-Geophysical Prospecting, Vol. XV, No. 1.

Bhattacharya, P.K. and Patra, H.P. 1978.- Direct Current Geoelectric Sounding, Elsevier. Amsterdam.

Boletín/IIE, Julio 1977.- Vol. 2 No. 3.

Calderón, A., 1965.- Estudio Geológico Preliminar del Área al Sur y Sureste de Mexicali, B. C. para aprovechar los Recursos Geotérmicos. Publicación Interna,C.F.E.

Cantos, F.J.- 1978.- Tratado de Geofísica Aplicada. Madrid.

Christopher H. Armstead, 1978.- Geothermal Energy, John Wiley and Sons, New York.

Danko, J. y Azze Pavón A., 1972.-Geoelectricidad I. Centro de Información Científica y Técnica.Universidad de la Habana, Cuba.

Díaz, C.R.S. y Arellano G. F., 1979.- Es tudio de Potencial Espontáneo y Resistividad en la Parte Sur de la Falla Cerro Prieto. Publicación Interna, C.F.E.

Díaz, C.R.S., 1979.- El Potencial Espontáneo como complemento en la Exploración Geotérmica. Tesis Profesional U.N.A.M.

DOE - CFE., 1978.- First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, San Diego, California, U.S.A.

European Association of Exploration Geophysicists, 1975.- Standard Graphs for Resistivity Prospecting.

García, D.S., 1975.- Informe Geoelectrónico de Cerro Prieto, B. C.- Publicación Interna, C.F.E.,

Garland, D. George., 1971.- Introduction to Geophysics. W.B. Saunders Company.

GEOCA. 1962.- Levantamiento Sismológico de Refracción en la Zona Geotérmica de Cerro Prieto, Municipio de Mexicali, Edo. de California, Publicación Interna C.F.E.

Geothermal Resources Council.- Junio 1979.- Geophysical Exploration Methods for Geothermal Resources.

Geza, K. 1966.- Principles of Direct Current Resistivity Prospecting Geopublication Associates. Berlin.

Grant, F.S. and West, G. I. 1965.- Interpretation-Theory in Applied - Geophysics. McGraw Hill.

Keller, G.V. and Frischeknecht, F.C.- Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Ed. Pergamon, New York.

Mañon, A. de la Peña, A. y Puente, I. Marzo 1978.- El Campo de Cerro - Prieto, Estudios Realizados y Programas Futuros. Simposio Sobre Exploración Geotérmica, Quito, Ecuador.

Martínez, B.J.J., M.F., de la Fuente, R.A. Beutelspacher., 1975.- Métodos Geofísicos en la Exploración Minera.

Mercado, G. S., 1975 .-Migración de Fluídos Geotérmicos y Distribución de Temperaturas en el Subsuelo del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B. C. México. Simposium, San Francisco, E. U.A.

OLADE.1977.- Organización Latinoamericana de Energía. Esquema de - una Metodología de Exploración Geotérmica.

Orellana, E.-Septiembre 1961.- Criterios Erróneos en la Interpretación de Sondeos Eléctricos. Revista de Geofísica.

Orellana, S.E. 1972.- Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua, Ed. Paraninfo, Madrid.

Orellana, S.E., H.M., Mooney, 1960. Tablas y Curvas Patrón para - Sondeos Eléctricos Verticales sobre Terrenos Estratificados.

Orellana, E., Junio 1967.- Normas Prácticas para la Ejecución de - Sondeos Eléctricos Verticales. Revista de Geofísica Nos. 101 y 102.

Orellana, E., Marzo 1966.-Notas sobre la Interpretación de SEV. Revista de Geofísica No. 97.

Orellana, E., Marzo 1960.- Algunas Cuestiones de Prospección Geoelectrica. Revista de Geofísica.

Parasnus, D.S., 1966.- Mining Geophysics, Ed. Elsevier, New York.

Parasnus, D.S.-1970.- Principios de Geofísica Aplicada, Ed. Paraninfo.

Razo, M.A., Abril 1974.- Comentarios sobre los estudios de Geofísica que se recomiendan para evaluar el potencial del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Publicación Interna, C.F.E.

Razo, M.A., 1978.- Primer Informe Parcial de los Estudios Geofísicos en Cerro Prieto, B. C., Publicación Interna, C.F.E.

Razo, M.A., Octubre 1976.- Sinópsis Geológica del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B.C., Publicación Interna, C.F.E.

Reyes, V.P. y Palma, P.O., 1979.- Estudio de la Zona Geotérmica de Araro, Mich. Tesis Profesional. UNAM.

Romero, G.C., Enero 1978.- Prospección Eléctrica de la Zona Geotérmica de Ixtlán de los Hervores, Mich. Publicación Interna, C.F.E.

Seara, J. L.- Nuevos Desarrollos en la Interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales. Inédito.

Smith, J.P., 1975.- Temas de Geofísica. Ed. Reverté, S. A.

Soto, P.S., 1975.- Campo Geotérmico sobre la Falla de San Jacinto y su posible ampliación hacia la Falla Imperial, Publicación Interna, C.F.E.

Wahl, F.E., 1976.- Geothermal Energy Utilization. John Wiley and Sons, New York.

Zohdy, A.- Rapid Graphical Method for Interpretation of A and H Type Electrical Soundings. Geophysics, Vol. 33 No. 5.

Zohdy, A., 1965.- The auxiliary point method of electrical sounding interpretation and its relationship to the Dar Zarrouk parameters. Geophysics Vol. 30.



## CURRICULUM VITAE

José Francisco Arellano Guadarrama es originario de la Cd. de México. Efectuó sus estudios profesionales en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Área Ciencias de la Tierra, del Instituto Politécnico Nacional (1972-1976), donde obtuvo el Título - de Ingeniero Geofísico con el trabajo de Tesis: "Prospección Geofísica por medio de Sondeos Eléctricos Verticales en la Porción - Norte del Valle de Mexicali y Campo Geotérmico de Cerro Prieto, - B. C.", en marzo de 1980.

Su desarrollo profesional lo ha efectuado en la Comisión Federal de Electricidad, en donde ha llevado a cabo los siguientes trabajos de relevancia:

- 1977 "Determinación de una Ecuación Representativa del comportamiento de la Curva de Temperatura Vs. Tiempo en el Pozo A-1, del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich.". Informe inédito de C.F.E.
- "Determinación de las Temperaturas de Estabilización en el - Pozo M-84 del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B.C." Razo - M.A. y Arellano, G.J. Fco. Informe Inédito C.F.E.
- "Estudios Geofísicos en el Valle de Mexicali y Campo Geotérmico de Cerro Prieto". Arellano G.J. Fco. y Fonseca L.H. Primera Reunión de Intercambio Técnico Sobre Geotermia. San Felipe, B.C.N.
- 1978 "Prospección Eléctrica de la Porción Norte del Valle de Mexicali y Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B.C." Arellano, G.J. Fco. y Razo M.A. Informe Inédito C.F.E.
- "Estudios de Resistividad en Cerro Prieto por C.F.E.". Razo, M.A., Arellano, G.J. Fco. y Fonseca, L.H. Primer Simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B. C., México. San Diego, Cal., U.S.A.
- 1979 "Estudio de Resistividad y Potencial Espontáneo en la Parte-Sur del Valle de Mexicali, B.C.N." Diaz Curiel S. y Arellano, G.J. Francisco. Segundo Simposio Sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, - B.C., México. Mexicali, B.C.N. México.

1980."Estudio de Resistividad en la parte Sur del Valle de Mexicali, B.C.N." Arellano, G.J. Francisco y Razo, M. A. Informe - Inédito C.F.E.

"Estudio Eléctrico de Resistividad en el Área Geotérmica de Tulicheak, en el Valle de Mexicali, B.C.N." Arellano, G.J. - Francisco y Razo, M.A. Informe Inédito C.F.E.



## CURRICULUM VITAE

José Carlos Romero González es originario de Huixtla, Edo. de Morelos. Efectuó sus estudios profesionales en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Área Ciencias de la Tierra, del Instituto Politécnico Nacional (1972-1975), donde obtuvo el Título de Ingeniero Geofísico con el mismo trabajo del Ing. José Francisco Arellano, (Tesis conjunta).

Se ha desarrollado profesionalmente en la Comisión Federal de -- Electricidad, donde ha efectuado los trabajos que se citan:

En 1977. Exploración Geofísica en las zonas geotérmicas de Ixtlán de los Hervores y Los Azufres en el estado de Michoacán. Esta zona, actualmente en exploración por medio de perforaciones, donde se espera instalar una planta piloto de SOMW en 1983.

En 1978 y 1979. Exploración de la zona geotérmica de La Primavera, Jal., por medio de resistividad magnetometría, termometría, potencial natural y sísmica pasiva. Actualmente esta área está en perforación.

## Cursos o Simposiums de Capacitación:

- a) Instrumentación Sismológica e Introducción a la tectónica de Placas.

Lugar: Ensenada, B. C. Institución C.I.C.E.S.E.  
Fecha: Agosto 15-30 1977.

- b) 2a. Reunión de Geología y Geotermia.

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chis.  
Instituciones: C.F.E. Sociedad Geológica Mexicana, S.A.R.H.  
y otras.  
Fecha: Junio 1978.

- c) 2o. Simposio del Campo Geotérmico de Cerro Prieto.

Lugar: Mexicali, B. C.  
Fecha: Octubre 1979.  
Instituciones: México (C.F.E.), U.S.A. Departamento de Energía, (D.O.E.).

d) Geophysical Exploration Methods.

Lugar: San Diego, Cal., U.S.A.

Fecha: Enero 1980.

Institución: Geothermal Resources Council.

Puesto actual en C.F.E.:

Ingeniero Geofísico en la Oficina de Exploraciones del Departamento de Geotermia.

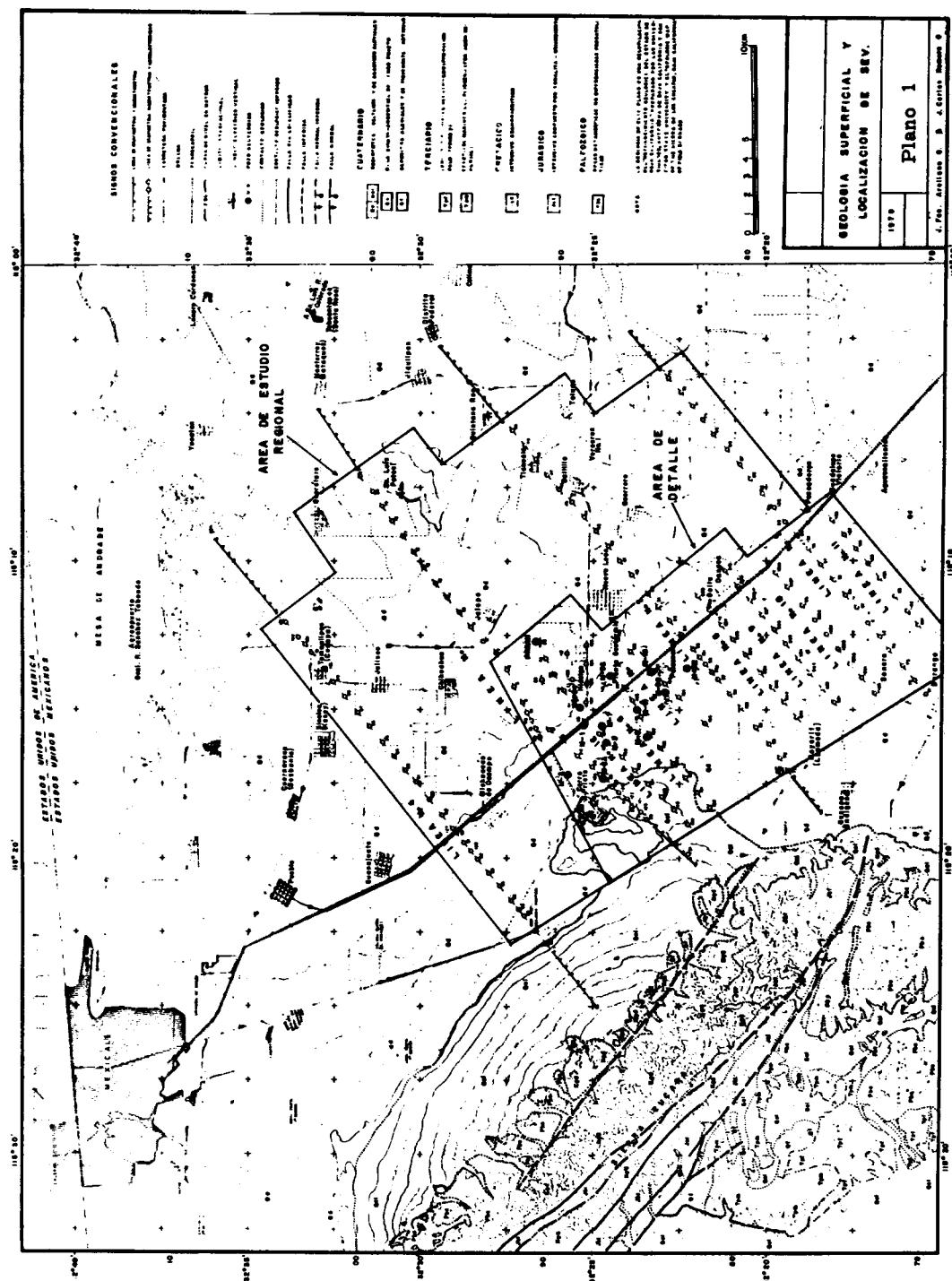
**AGRADECIMIENTOS**

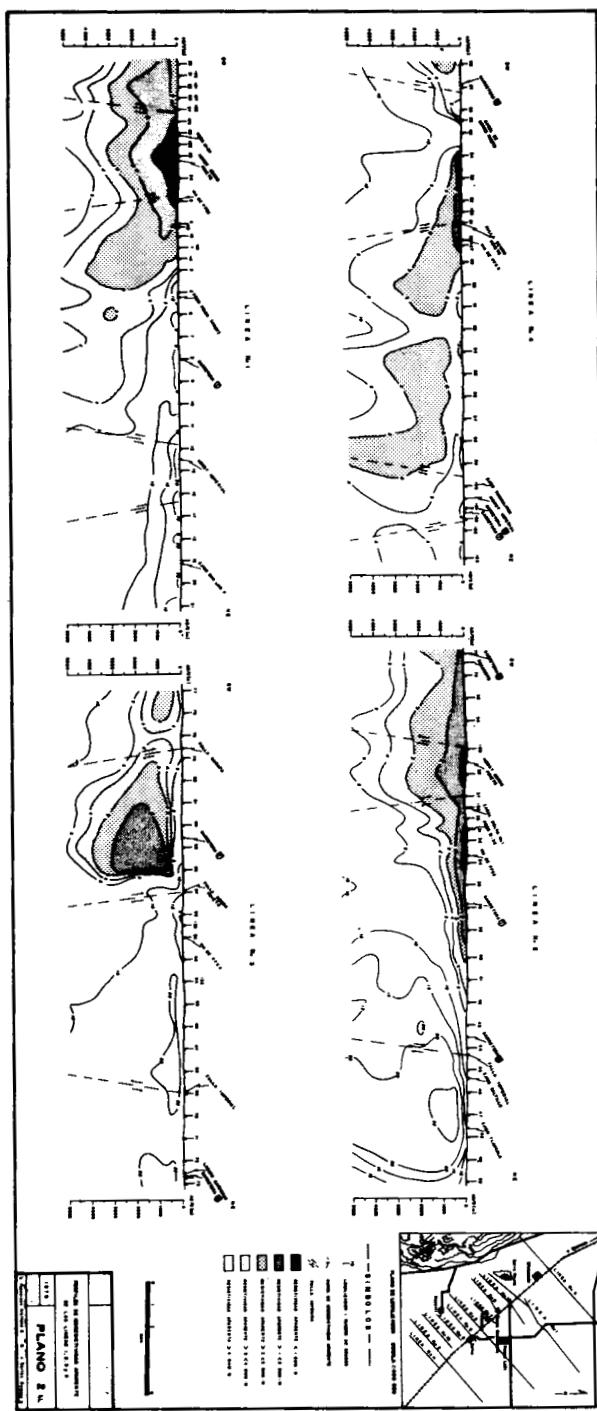
Los autores agradecen a la Comisión Federal de Electricidad y a -  
su personal de la Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, B. C.,-  
por haber permitido la ejecución del presente trabajo y por las -  
discusiones provechosas en la elaboración del mismo.

De igual forma al Sr. Ing. Antonio Razo Montiel, Jefe de la Oficina  
de Exploraciones Geotérmicas, por la dirección y coordinación -  
en el desarrollo de esta obra.

## SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES

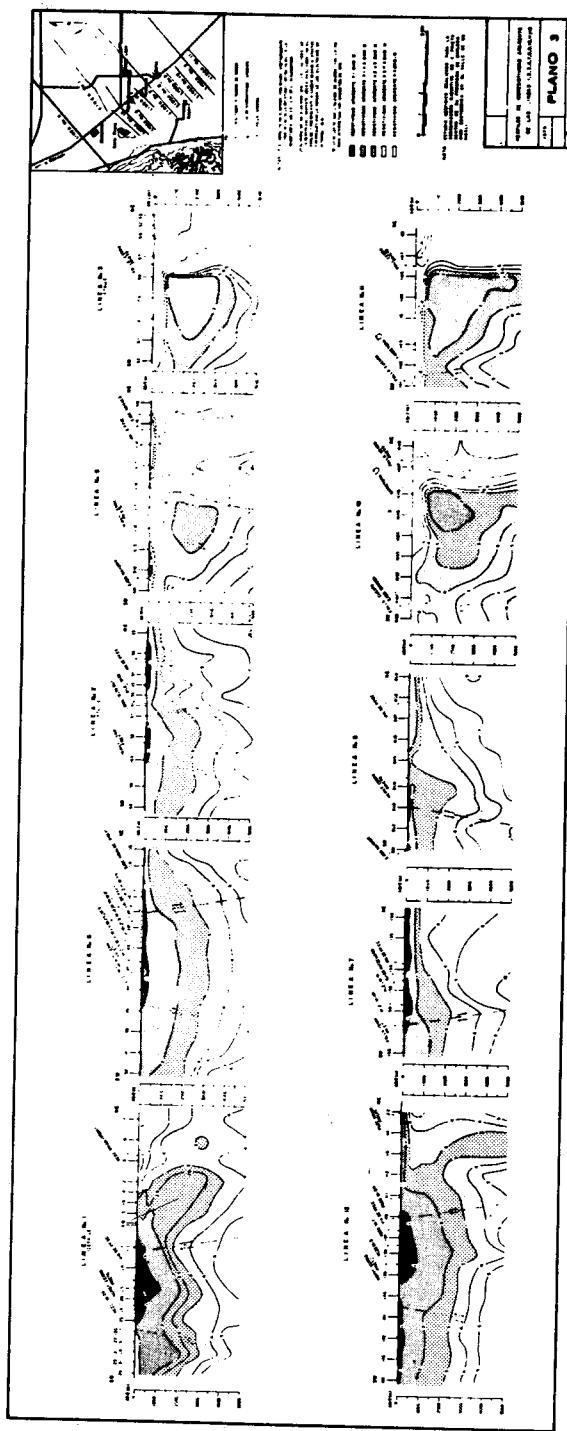
171

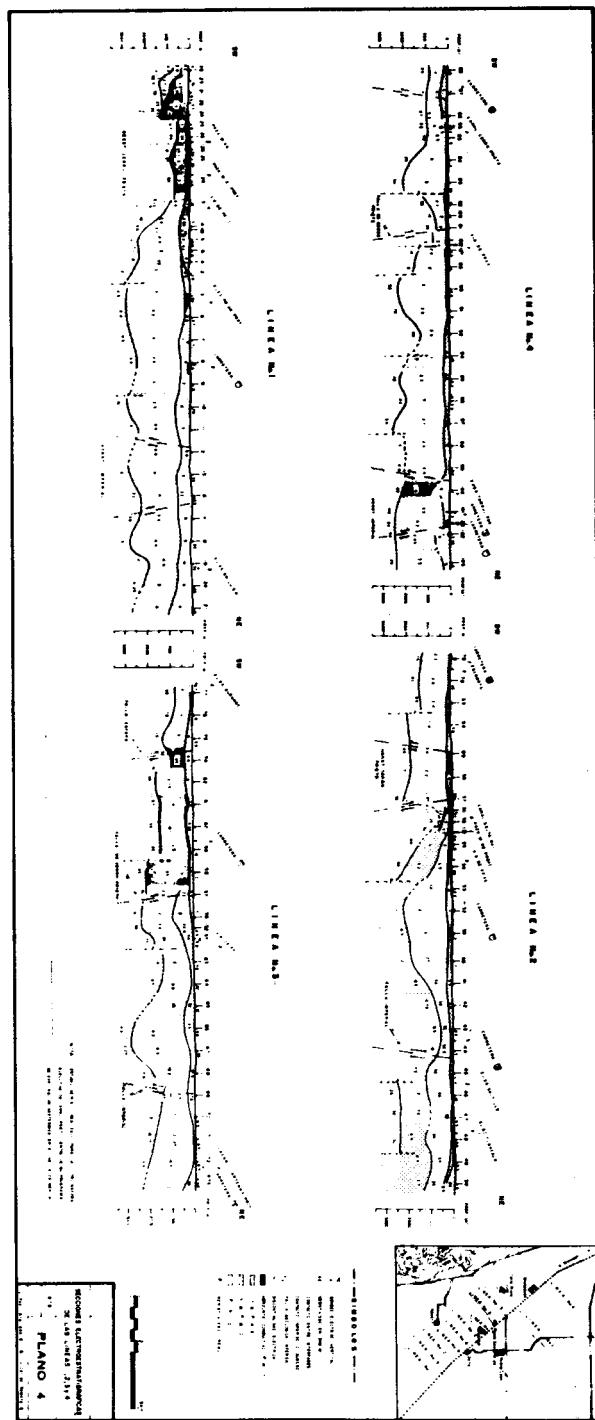




SÓNDEOS ELECTRICOS VERTICALES

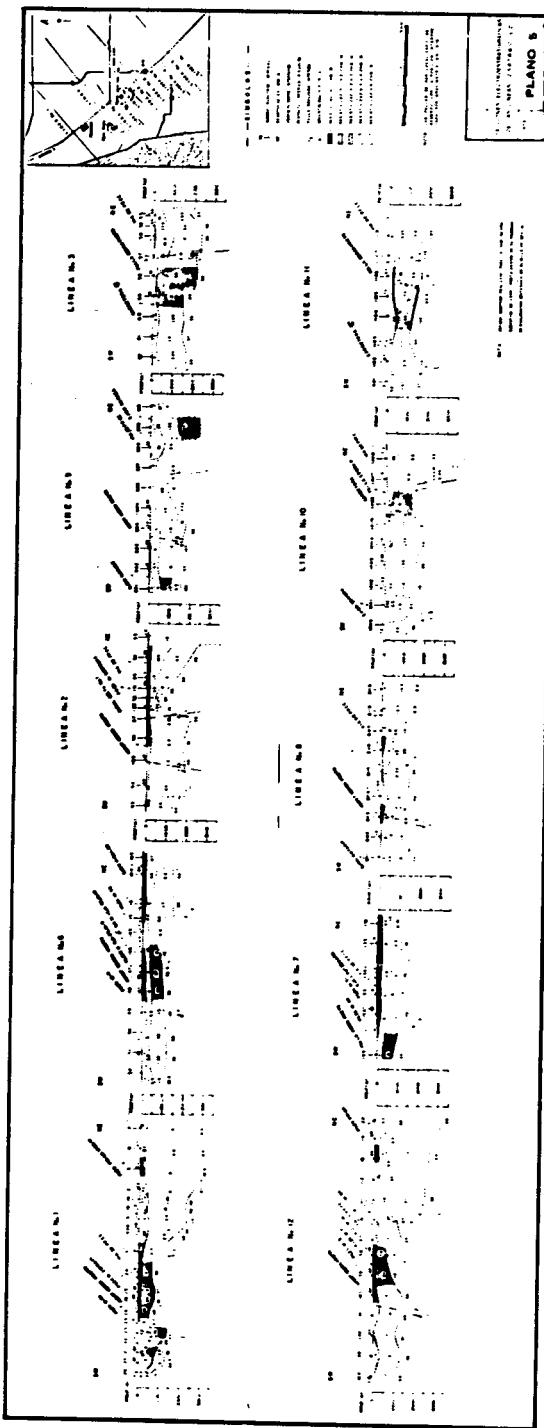
173

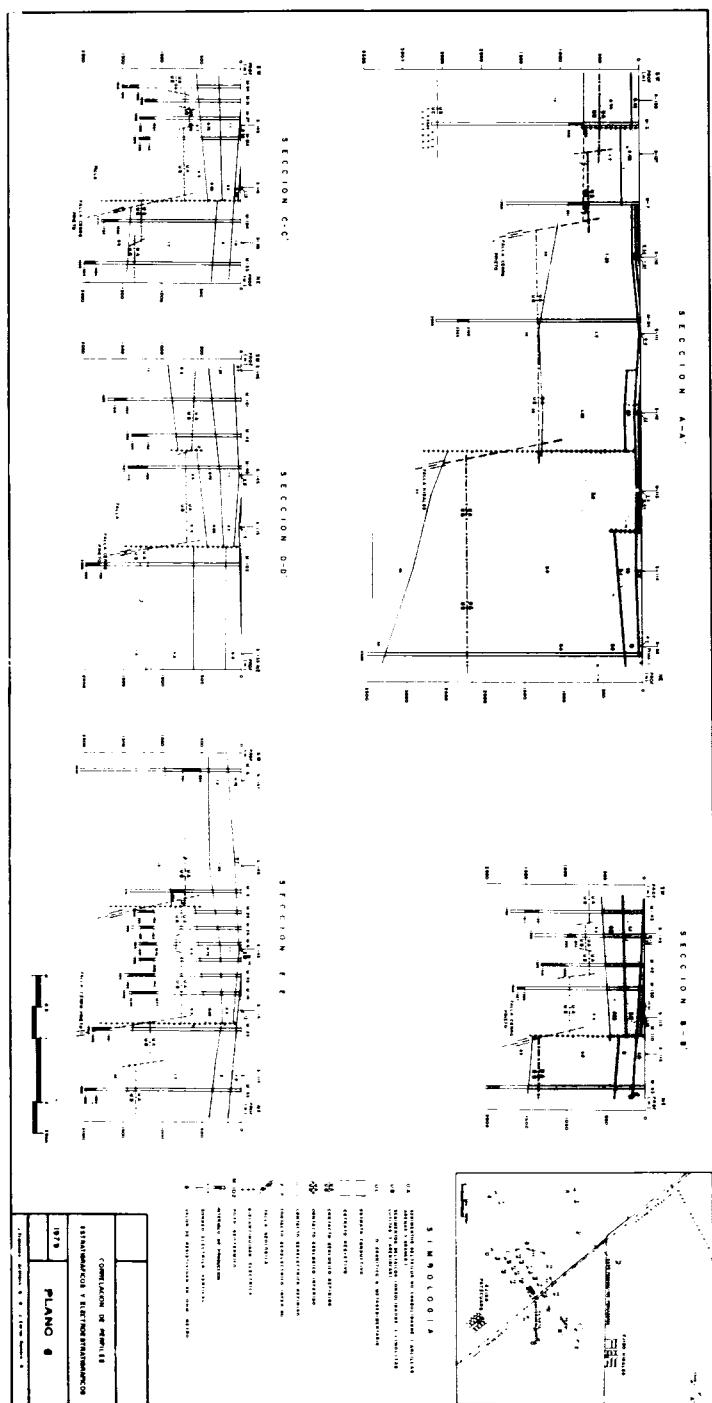


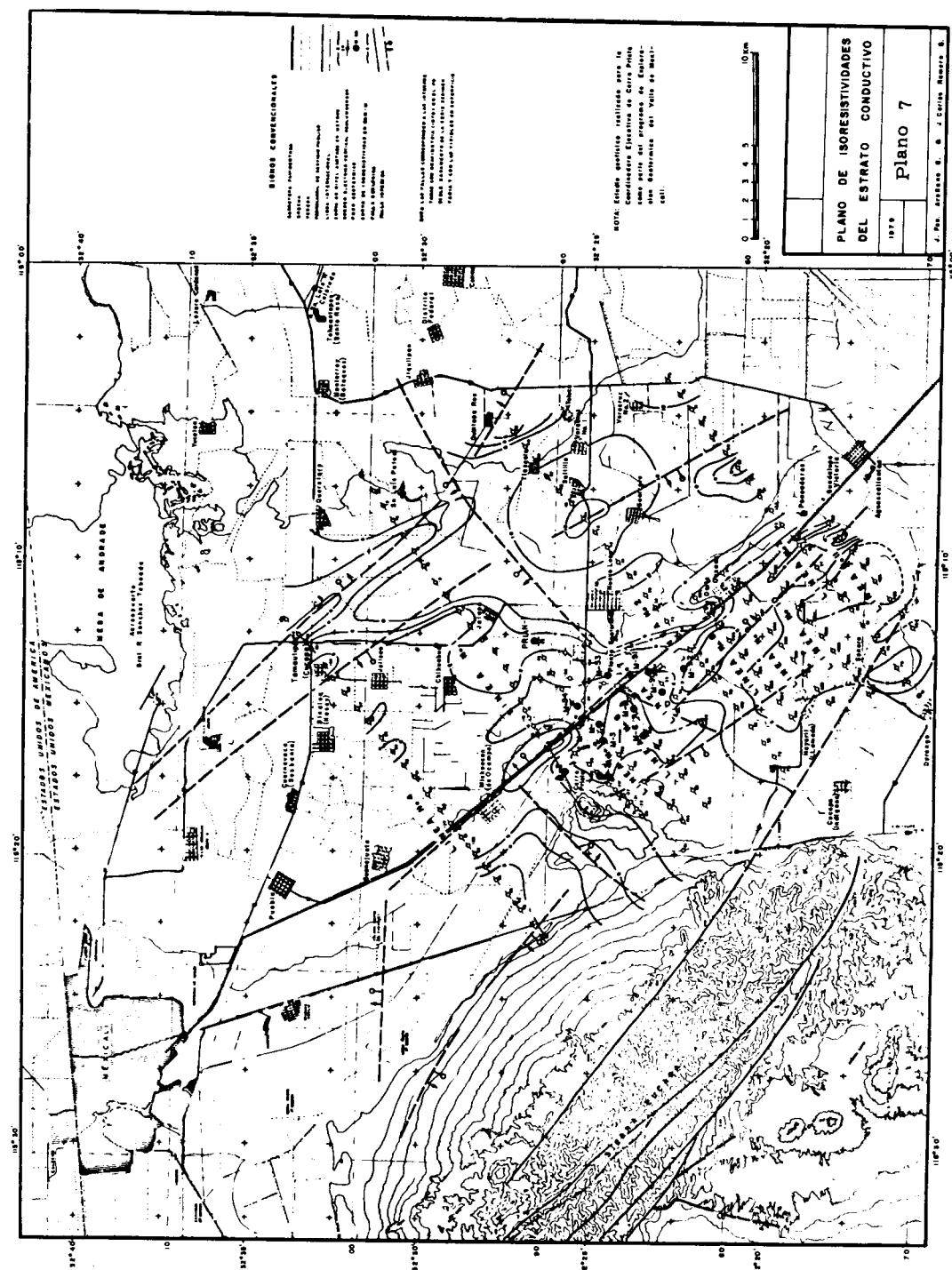


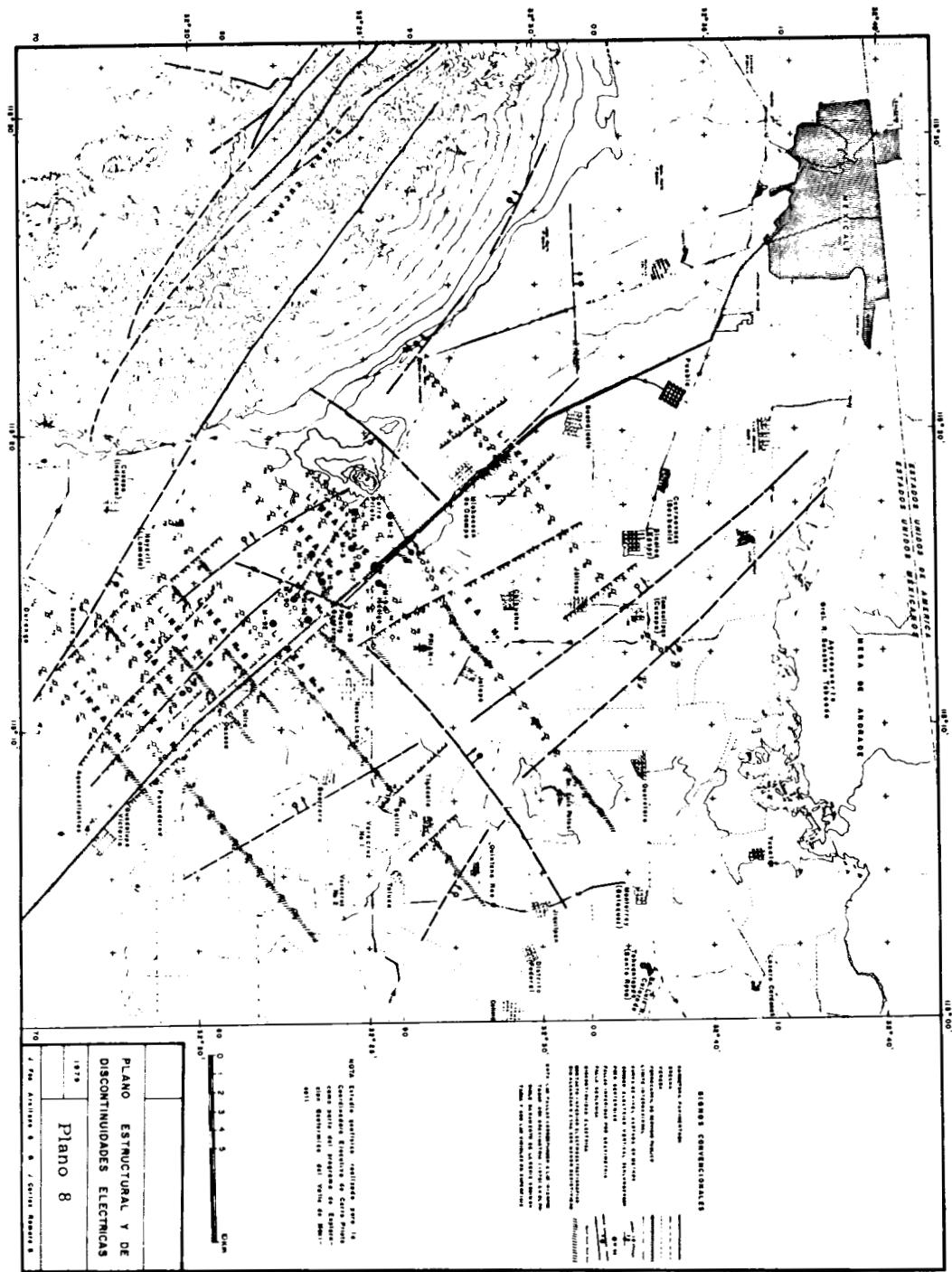
SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES

175









**Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, A. C.**

APARTADO POSTAL 53-077 TELS: 545-74-60 EXTS. 3713, 3075, 3398 Y 567-82-61  
MEXICO 17, D. F.

**MESA DIRECTIVA**

**1977-1979**

*Presidente:*

Ing. Antonio Deza Suárez

*Vicepresidente:*

Ing. Alberto Arroyo Pichardo

*Secretario:*

M. C Héctor Palafox Rayón

*Tesorero:*

Ing. Mario Rosello Guzmán

*Editor:*

M. C. Rogelio Aspiroz Aguilar

*Vocales:*

M. C. José Ponce de León  
Coatzacoalcos, Ver.

Ing. Armando Núñez Núñez  
Reynosa, Tam.

Ing. Carlos López Ramírez  
Tampico, Tam.

Ing. Sergio Figueroa Arias  
Poza Rica

Ing. Rodolfo Marines Campos  
Vocal I.M.P.

Ing. Serafín Ortega Aguilar  
Córdoba, Ver.

Ing. Jorge Franco Páez  
Vocal I.P.N.

M. C. Luis del Castillo  
Vocal U.N.A.M.

*Presidente Saliente:*  
Ing. Raúl Silva Acosta

**COMUNICACION A LOS SOCIOS DE LA  
A.M.G.E.**

Se comunica a los socios de los resultados de la votación para elección de la Mesa Directiva para el bienio 1979-1981, llevado a efecto por el Comité de Elecciones constituida por los Sres. Ings. Antonio García Rojas, Armando Eguía Huerta y Patricio Díaz Frías, socios de nuestra Asociación y, de acuerdo a los reglamentos de la misma.

Atentamente.

ING. ROGELIO ASPIROZ AGUILAR  
EDITOR.

Siendo las 12:00 Hrs. del día 16 de Noviembre de 1979, se reunieron los Sres. Ings. Antonio García Rojas, Armando Eguía Huerta y Patricio Díaz Frías, miembros del Comité de Elecciones para el Bienio - **1980-1981**. Se procedió al escrutinio de los votos recibidos, habiéndose obtenido los siguientes resultados:

Total de votos recibidos: 205

Votos cancelados: 1

MESA DIRECTIVA                      Bienio                      **1980-1981**

	<u>No. de Votos</u>
Presidente: LUIS MADRIGAL UGALDE	188
Vicepresidente: RAYMUNDO ACOSTA OJI NAGA	157
Secretario: RAYMUNDO AGUILERA IBARRA	183
Tesorero: MIGUEL BARRIENTOS MARTINEZ	194
Editor: ROGELIO ASPIROZ AGUILAR	168
Vocal IPN: JORGE FRANCO PAEZ	200
Vocal UNAM: ENRIQUE DEL VALLE TOLEDO	194
Vocal IMP: RICARDO DIAZ NAVARRO	201

Para cualquier aclaración al respecto, la documentación correspondiente se encuentra a su disposición con el mencionado Comité de -- Elecciones.

Atentamente,

El Comité de Elecciones

Ing. Armando Eguía Huerta

Ing. Antonio García Rojas

Ing. Patricio Díaz Frías.

# EXPLORACIONES DEL SUBSUELO, S.A



- OCEANOGRAFIA
- GEOFISICA
- GEOLOGIA
- PERFORACIONES
- REPRESENTANTE EN MEXICO DE  
DECCA SURVEY (LATIN AMERICA) INC.

EDSSA

PASEO DE LA REFORMA 393-401  
MEXICO 5, D.F. TEL. 511-27-66

SOCIOS PATROCINADORES

PETROLEOS MEXICANOS

COMPAÑIA MEXICANA DE EXPLORACIONES, S.A.

C A A S A

D U P O N T

SERCEL INC.

WESTERN GEOPHYSICAL

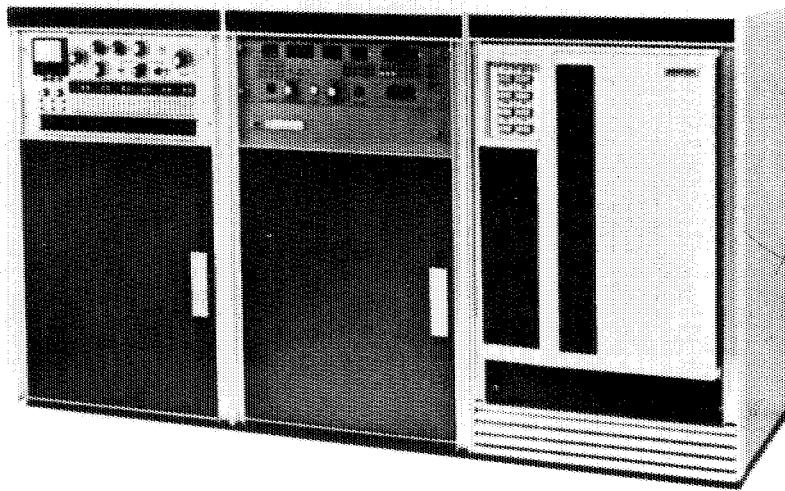
GEOPHYSICAL SERVICE DE MEXICO, S.A. DE C.V.

PETTY GEOPHYSICAL ENGINEERING DE MEXICO

El equipo digital de campo SUM-IT VII es un sistema completo para emplearse en el registro sísmico de datos con cualquier técnica de campo: Vibroseis, Dinoseis, Dinamita y otros generadores de energía.

El formato empleado es SEG-A de 9 pistas -- en cinta de  $\frac{1}{2}$ ".

# SUM-IT VII



Para mayor información dirigirse a : Electro - Technical Labs Div., Mandrel Industries, Inc.  
P. O. Box 36306, Houston, Texas 77036



ELECTRO-TECHNICAL LABS

## **Com\* Mand, LO MAXIMO !**

TANTO EN ASISTENCIA PARA CENTROS DE  
PROCESADO.

COMO LA GRAN AYUDA INMEDIATA EN EL  
CAMPO.



EL SISTEMA Com\* Mand ES DE FACIL  
INSTALACION EN EL CAMPO O COMO  
UNA EXTENSION DE UN CENTRO DE  
PROCESADO ESTABLECIDO. DEBIDO A  
SU POCAS SENSIBILIDAD A LAS  
CONDICIONES CLIMATOLOGICAS,  
EL SISTEMA Com\* Mand PUEDE SER  
INSTALADO EN TRAILERS, CAMPOS  
PORTATILES O EN UNIDADES

# Tres veces mejor.

Litton Resources Group (El Grupo de Recursos Litton) se halla compuesto de tres compañías bien conocidas en el terreno de la exploración geofísica.

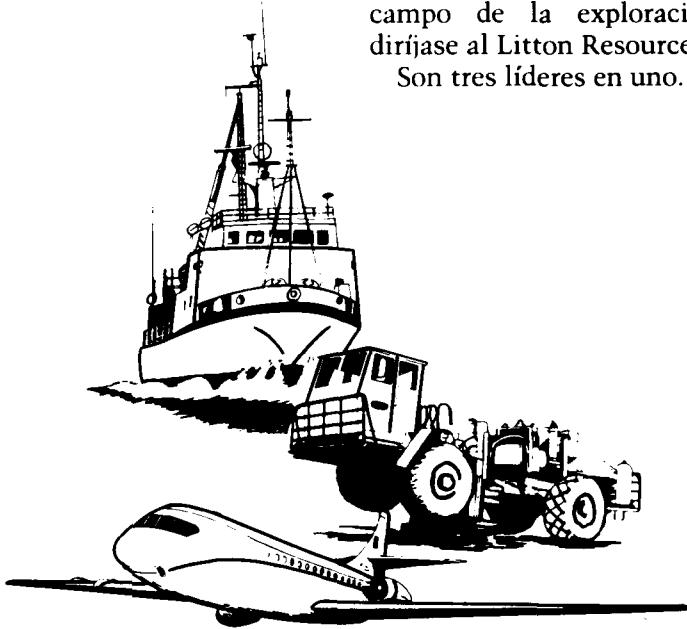
Western Geophysical es una de las líderes de la industria en servicios de exploración terrestre y marítima. Para ello utiliza métodos sísmicos gravitacionales y magnéticos, entre otros, para obtener en casi todas las regiones del mundo entero la información geofísica requerida.

Aero Service se distingue por la forma en que lleva a cabo toda clase de levantamientos aéreos y todo tipo de aerocartografía desde el radar de visión lateral hasta los métodos fotogramétricos y de espectro múltiple más modernos.

Litton Resources Systems es una líder en la manufactura de equipo electrónico y mecánico de exploración. Es la única compañía en el mundo entero que ha diseñado y construido una línea completa de equipo sísmico para uso en tierra y mar. LRS distribuye esta línea de equipo en todos los países del mundo.

Para el mejor servicio total en el campo de la exploración geofísica diríjase al Litton Resources Group.

Son tres líderes en uno.



**LITTON RESOURCES GROUP**

P.O. Box 2469, Houston, Texas 77001

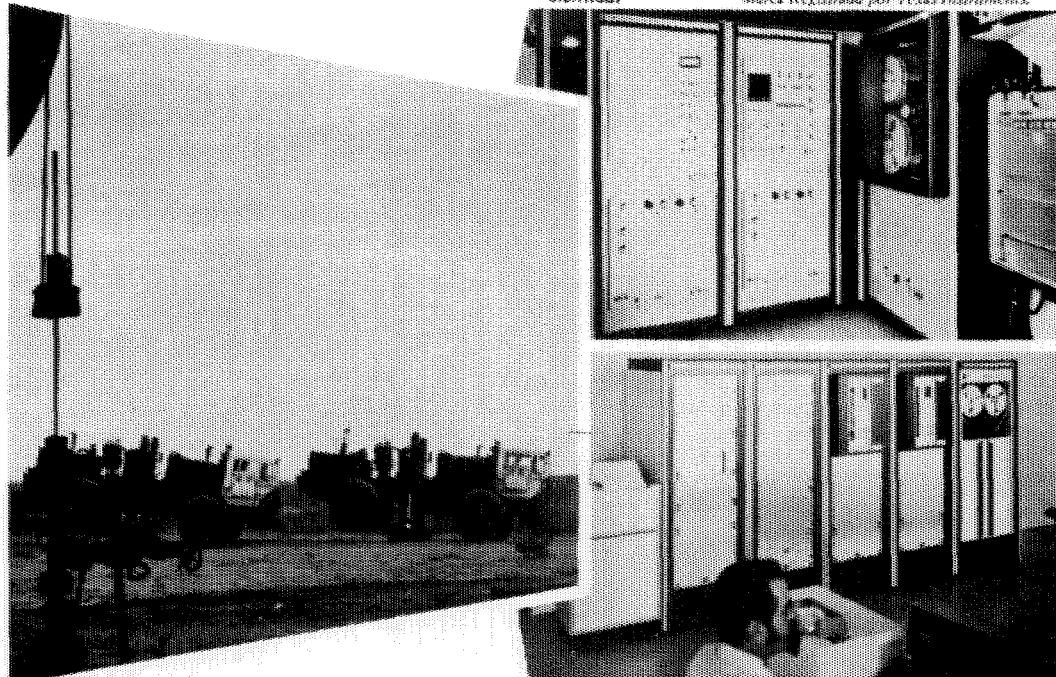


# EN EL TRABAJO

*... para ayudar a resolver sus  
problemas en exploracion sismica*

Sistema de registrado digital (DFS-IV\*) montado  
en camión usado por GSI para reunir la información  
sísmica.

\*Marca Registrada por Texas Instruments.



Los vibradores GSI combinan potencia  
y frecuencia para proveer información  
sísmica de alta relación señal-ruido.

Los programas de procesamiento de GSI  
combinados con Texas Instruments  
Multiple Applications Processor (TIMAP\*)  
producen información sísmica muy  
efectiva en costo, rapidez y alta fidelidad.

Para mayores informes comuníquese a GSI de  
Mexico, S. A. de C. V., Av. Juárez 119, Despacho  
42, Mexico 1, D. F. Telefono 566-92-44.

**GSI de MEXICO, S.A. de C.V.**  
SUBSIDIARIA DE  
**TEXAS INSTRUMENTS**  
INCORPORATED





## Du Pont, S.A. de C.V.

Morelos N° 98-5º Piso  
México 6, D.F. Tel. 546-90-20

### DEPARTAMENTO DE EXPLOSIVOS

Fábrica Ubicada en:  
**DINAMITA DURANGO**

**DINAMITAS**  
**GEOMEX\* 60% (Gelatina Sismográfica)**  
**SUPER MEXAMON\***  
**TOVEX\* EXTRA**  
**DETOMEX\***  
**FULMINANTES**  
**ESTOPINES ELECTRICOS**  
**ESTOPINES SISMOGRAFICOS "SSS"**

### ACCESORIOS DEL RAMO

OFICINAS EN: TORREON, COAH.  
Edificio Banco de México Desp. 305 Tel. 2 09 55

REPRESENTANTE EN: GUADALAJARA, JAL  
Juan Manuel No. 1184 Tel: 25 56 82 y 25 56 08

• MARCA REGISTRADA DE DU PONT.

# Operación con unidades Vibroseis\*

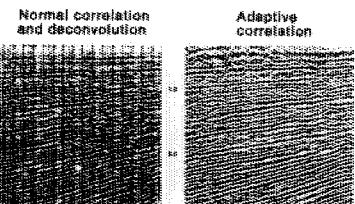
## Aplicada a la tecnología de campo



- Diseño de vehículo adaptado al terreno.
- Correlación digital de campo.
- Diseño específico de campo.

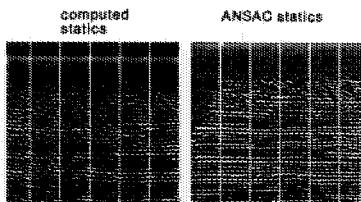
### Adeuada para el proceso de datos

#### TVAC



- Técnica de pulsos compresionales para el contenido de información traza por traza.
- Deconvolución apropiada a la mezcla de fases, característica del Vibroseis.
- Apilamiento vertical con la consiguiente supresión de ruido de gran amplitud.

#### ANSAC



Esta técnica está diseñada para determinar y aplicar correcciones estáticas inherentes al sistema CDP basada en las siguientes consideraciones.

- Correcciones por fuente de energía.
- Correcciones por detección
- Echado
- Dinámicas residuales

La técnica de Vibroseis requiere de una continua evaluación de los parámetros de campo y su relación con una cuidadosa planeación del proceso de datos. Y esta es la función del Seiscom/Delta en

las operaciones Vibroseis. Eficiencia en el trabajo de campo, calidad en el centro de proceso. Mayor información con el representante Seiscom/Delta.



Seismic Computing Corp.      Delta Exploration Company Inc.  
P. O. Box 36789      Houston, Texas 77036      713/785-4060



\*Registered trademark and service mark of Continental Oil Company