

ESTUDIO DE RESISTIVIDAD Y POTENCIAL ESPONTANEO EN LA PARTE SUR DEL VALLE DE MEXICALI, B. C. N.

S. Díaz C. y J. F. Arellano
Comisión Federal de Electricidad
Gerencia General de Estudios de Ingeniería Preliminar
México D. F.

INTRODUCCION

Con el fin de obtener información sobre las posibilidades geotérmicas de la parte sur del Valle de Mexicali, la Comisión Federal de Electricidad ha realizado estudios complementarios geológicos, geoquímicos y geofísicos en un área de aproximadamente 600 km², en la región comprendida entre Mesa de Andrade y la Estación Guadalupe Victoria, B. C. (Fig. 1). En esta zona, la actividad geotérmica se caracteriza por la presencia de temperaturas anormales —de 35° a 45°C— en el agua de algunos pozos someros perforados a la profundidad de 100 m por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

Estructuralmente, la zona está afectada por la falla de Cerro Prieto, visible superficialmente en la parte NE de la Mesa de Andrade y en su prolongación al SE hasta el Golfo de California. En el extremo NO de la falla se encuentra el campo geotérmico de Cerro Prieto, cuya actividad termal se ha relacionado con ella.

Con base en la geología del área y el resultado del estudio geoelectrico efectuado en la parte N del Valle de Mexicali, se programaron dos levantamientos geofísicos regionales mediante los métodos de resistividad eléctrica y potencial espontáneo.

Para el levantamiento geoelectrico se ejecutaron 110 sondeos eléctricos verticales, utilizando el dispositivo Schlumberger con espaciamiento máximo entre electrodos de corriente de 10 km ($AB/2 = 5000$ m), en seis líneas regionales de 20 km de longitud aproximadamente, con rumbo NE-SO (líneas Nos. 18, 19, 20, 21, 22 y 23) para cruzar perpendicularmente la falla Cerro Prieto.

Como complemento del estudio de resistividad se llevó a cabo un levantamiento de potencial espontáneo, con mediciones de diferencias de potencial entre dos electrodos no polarizables separados 200 m, siguiendo la técnica de salto de rana, sobre las seis líneas regionales anteriores y en otras tres líneas de cierre de polígonos con una longitud de 35 km cada uno aproximadamente y rumbo NO-SE (líneas A, B y C).

GEOLOGIA

Regionalmente el área está constituida por rocas metamórficas, ígneas intrusivas y sedimentarias. En la Sierra del Mayor se presentan rocas ígneas intrusivas y metamórficas formadas por granitos, granodioritas, gneises y esquistos, integrando lo que se conoce como el basamento granítico del Cretácico Superior. Sobre él descansan discordiantemente rocas sedimentarias.

Las rocas sedimentarias están constituidas predominantemente por rocas elásticas de edad reciente, diferenciadas únicamente por la manera en que fueron depositadas (Fig. 2). Dichas rocas son:

Limo arcillo-arenoso de origen aluvial que constituyen los suelos agrícolas del Valle de Mexicali.

Limos y arenas de origen aluvial y costero que se depositaron por la interacción entre el flujo del Río Colorado y las mareas del Golfo de California.

Arenas de origen eólico y aluvial del Desierto de Altar (Díaz Cabral, 1979).

Desde el punto de vista tectónico la región se encuentra dentro de la zona de influencia del Sistema San Andrés, del cual la principal falla expuesta es la Cerro Prieto. Otras fallas como las Cucapás, Laguna Salada e Imperial, observadas las dos primeras en la Sierra de Cucapás, se han inferido en la región mediante la interpretación gravimétrica (Fonseca H. y Razo, M. A., 1978).

De acuerdo a las perforaciones del campo de Cerro Prieto se han definido tres unidades que conforman la columna litológica generalizada del Valle de Mexicali, siendo descritas éstas de la siguiente manera:

UNIDAD A

Integrada por sedimentos deltaicos no consolidados (arcillas, limos, arenas y gravas) susceptibles de aceptar esfuerzos tectónicos de baja magnitud. Este paquete sedimentario se conoce como sedimentos no consolidados.

UNIDAD B

Constituida por sedimentos consolidados (lutitas y arenis-

cas) en parte metamorfizados y que subyacen a la unidad A. Esta unidad de apariencia rígida puede aceptar cierto tipo de esfuerzos pero en algunas ocasiones llega a fracturarse.

UNIDAD C

Está representada por el basamento granítico y metasedimentario (Puente, I., 1978).

TRABAJOS PREVIOS

A partir de los datos de temperatura registrados en los pozos someros, la SARH construyó un plano de configuraciones de isotermas (Fig. 1) en el que se observan dos máximos de temperatura (35°C y 45°C) ubicados en el poblado Plan de Ayala, B. C. y Riito, Son., respectivamente.

Con el objeto de determinar la procedencia del flujo térmico hacia los pozos de la SARH, la CFE programó cuatro pozos de 250 m de profundidad, denominados MA-2, MA-4, MA-1 y MA-3, de los que a la fecha se han perforado los dos últimos. Los registros de estos pozos señalan temperaturas de fondo de 28°C y 31°C, que se consideran normales, sin proporcionar evidencia de la dirección del flujo térmico.

En lo que corresponde a estudios geoquímicos, la CFE llevó a cabo 30 mediciones de concentraciones de vapor de mercurio distribuidas en un área de 150 km², cubriendo las anomalías térmicas del poblado Murguía a Riito, Son. (Sánchez, J., de la Peña, A., 1979). Este método está basado teóricamente en las emanaciones del vapor de mercurio que puedan estar relacionadas con zonas geotérmicas y que ascienden a la superficie a través de fallas o fracturas. Con las mediciones se encontraron cuatro zonas con contenido anómalo de mercurio en las mismas áreas de anomalías termaleas.

ESTUDIO DE RESISTIVIDAD

El método de resistividad eléctrica es una técnica geofísica que permite la determinación de la distribución de las resistividades de las rocas en el subsuelo. Se conoce que la resistividad eléctrica de las rocas es afectada por varios factores, entre los que se incluyen la temperatura, porosidad, grado de saturación, salinidad del fluido saturante, factor geométrico del espacio poroso y la conductividad de la matriz rocosa (Meidav, T., *et al.*, 1976). En el caso del Valle de Mexicali, la temperatura es un parámetro cuyo efecto no es posible discriminar de los de porosidad y salinidad, y únicamente por la dependencia entre los bajos resistivos con las estructuras geológicas que estén ligadas a cierta actividad termal es posible que los estudios de resistividad adquieran utilidad en la localización de zonas geotérmicas.

En el estudio de resistividad se emplearon como

equipos de emisión y recepción, respectivamente, un transmisor de polarización inducida marca Scintrex, con 15 kilowatts de potencia, y un voltímetro de alta impedancia.

Las curvas resultantes de los sondeos eléctricos verticales fueron interpretadas mediante la comparación gráfica de las curvas de campo con las de la colección de curvas patrón de E. Orellana y Mooney (1966), además de las editadas por la Asociación Europea de Geofísica de Exploración (1969), siguiendo la técnica del método del punto auxiliar. Se dispuso también el uso de un programa de computadora para la comprobación de la interpretación gráfica.

Los resultados del estudio de resistividad son presentados en forma de planos de configuración de isorresistividades aparentes, secciones electroestratigráficas y un plano con las discontinuidades eléctricas determinadas en este estudio.

CONFIGURACIONES DE ISORRESISTIVIDADES APARENTES

En la figura 3 se presenta el plano con la configuración de isorresistividades aparentes para valores de $AB/2 = 2.0$ km. En este plano se aprecia una clara relación entre las condiciones geológico-estructurales y la distribución de resistividades aparentes, de las que se desprenden las siguientes conclusiones generales:

1. Se observa la presencia de la falla de Cerro Prieto en términos de un gradiente pronunciado de las curvas de isorresistividad, con alineamiento NO-SE, localizado paralelo a la vía del ferrocarril entre 3 y 5 km.
2. En toda la región SO de la falla Cerro Prieto se muestra un mínimo resistivo con valores de 0.5 a 2 ohm-m. Se extiende en una franja de cerca de 10 km de ancho, que corre paralelamente a la falla, y tiene su extremo NO en las cercanías de la Colonia Carranza y su límite SE abierto hacia el Golfo de California.
3. Hacia el O de la Colonia Carranza se presenta un incremento suave de resistividades (de 2 a 5 ohm-m). Este incremento y la forma de la configuración de las isorresistividades se han relacionado con las rocas del subsuelo, que son una prolongación de la Sierra de Cucapás, debajo de los depósitos aluviales.
4. Se enfatiza una zona de alta resistividad localizada al S y SE del poblado Guadalupe Victoria, en los sondeos 1802, 1801, 1814, con valores hasta de 10 ohm-m, con la misma tendencia NO-SE del sistema estructural principal que afecta la zona. Su forma de elipse cubre una extensión aproximada de 20 km² y probablemente tienen su límite al SE, en las inmediaciones del poblado Francisco Murguía, quedando alojada entre la falla Cerro Prieto y la continuación inferida de la falla Imperial.

5. Hacia el NE de este máximo se observa otro con valores hasta de 20 ohm-m, formando la zona más resistiva de la región en estudio, que posiblemente tiene una relación estructural y con la acción subterránea del Río Colorado.

6. En la región de Riito se aprecia un mínimo relativo con valores de 3 ohm-m.

SECCIONES ELECTROESTRATIGRAFICAS

La interpretación cuantitativa de sondeos eléctricos verticales se muestra mediante perfiles electroestratigráficos con los que se han elaborado bosquejos geológicos de cada una de las secciones. En las figuras 4 y 5 se presentan los perfiles de las líneas Nos. 18, 19, 20 y 21 de los que se obtienen las siguientes conclusiones:

1. En todos los perfiles resalta el efecto de la falla Cerro Prieto, con rumbo aproximado N 45°O que provoca cambios bruscos en las resistividades y profundidades calculadas.

2. Existen básicamente tres unidades electroestratigráficas en todas las secciones. La primera unidad está compuesta por varias capas superficiales con gran variación en los valores de resistividad (1 a 48 ohm-m) y en sus espesores (de 5 m a 600 m, alcanzando en algunos lugares hasta 2500 m). Esta primera unidad, que se ha denominado estrato superficial, es interpretada como parte de la cubierta de arcillas, limos, arenas y gravas de origen deltaico (sedimentos no consolidados) con algunas zonas saturadas de agua de contenido salino variable.

3. Subyaciendo al estrato superficial se encuentra la segunda unidad formada por un estrato conductivo con espesores de 500 m a 2500 m (en algunas regiones hasta 3500 m) y resistividades menores de 5 ohm-m. Este horizonte conductivo es correlacionable con una parte de los sedimentos no consolidados, con diferente comportamiento eléctrico debido a un incremento en su contenido salino. En la línea 18 se observa que esta capa reduce gradualmente su espesor hacia el SO de la falla Cerro Prieto, con un suave cambio de resistividad entre los valores menores y mayores de 1 ohm-m, suponiéndose que se debe a cambios de facies o diferencias en la salinidad. La parte del conductivo con valores menores de 1 ohm-m, localizado al SO de la falla de Cerro Prieto, corresponde con el mínimo de resistividad configurado en los planos de isoresistividades aparentes. Cabe hacer notar que en las líneas 20 y 21 el conductivo presenta valores menores de 1 ohm-m o ligeramente mayores, debido a la influencia de los sedimentos en los que el efecto de la intrusión del agua salada del Golfo de California se hace más evidente.

4. Bajo el estrato conductivo en la parte SO de la falla Cerro Prieto se detectó un tercer horizonte que se denominó resistivo profundo, con resistividades de 10 a 370 ohm-m, y cuyo espesor no fue posible determinar. Según se ha visto en las interpretaciones de sondeos eléctricos verticales en la zona de producción del campo

de Cerro Prieto, en las que se encontraron las mismas unidades geoelectricas, el resistivo profundo parece corresponder con la unidad B; es decir, con los sedimentos deltaicos consolidados (lutitas y areniscas).

5. Mediante el análisis de las secciones electroestratigráficas, en las distintas unidades geoelectricas, se han encontrado algunas discontinuidades en la distribución de las resistividades y sus profundidades. De esta manera, se observa que en el estrato superficial se incrementan los espesores y resistividad hacia el NE de las secciones, hasta alcanzar valores de profundidad de 2500 m y resistividades de 48 ohm-m. Esto parece estar relacionado con un mayor paquete de rocas elásticas porosas, con menor contenido salino debido al aporte de aguas subterráneas del Río Colorado.

6. En el área NE de la falla Cerro Prieto, y subyaciendo al horizonte resistivo superficial, se presenta el estrato conductivo con resistividades de 1 a 5 ohm-m, suponiéndose que se trate del mismo horizonte conductivo del otro lado de la falla. Como se comentó anteriormente, este estrato muestra un mayor espesor que el calculado en la región SO y solamente se detecta la cima del estrato resistivo profundo en algunas partes de la línea 20, a profundidades entre 2200 m a 3200 m. Dentro del conductivo se muestra una zona de muy baja resistividad, con valores menores de 1 ohm-m, a una profundidad de 2500 m, en las cercanías del sondeo 1815 de la línea 18. En la línea 19 este mínimo se detectó entre los sondeos 1904 al 1910-2, con profundidades que oscilan entre los 1750 m y 2500 m. Para la línea 20 se detectó entre los sondeos 2012 al 2003, con 5 km de extensión lateral y a profundidades mayores de 1000 m y 1750 m.

ESTUDIO DE POTENCIAL ESPONTANEO

Dentro de la literatura técnica reciente se han reportado anomalías de potencial espontáneo relacionadas aparentemente con actividad geotérmica (Zohdy, Anderson y Muffler, 1973; Zablocki, 1976; Anderson y Johnson, 1973; Combs y Wilt, 1976; Corwin y Hoover, 1979). Aunque el mecanismo electroquímico involucrado en la generación del potencial espontáneo no está bien entendido, se supone que está relacionado directamente con los acoplamientos electrocinéticos y termoeléctricos de un yacimiento geotérmico. Debido a que un sistema geotérmico usualmente está caracterizado por la presencia de un fluido circulante caliente, se supone que la temperatura elevada y el movimiento de fluidos en un medio poroso son capaces de generar los campos potenciales que se observan en la superficie.

RESULTADOS

Los perfiles construidos con los datos de campo de las líneas 18, 19, 20 y 21 se muestran junto con parte de las secciones electroestratigráficas en las figuras 4 y 5 en las que es posible observar que el nivel del ruido (residual)

se comporta de una manera general oscilando aproximadamente 40 mv en todas las líneas de estudio.

En un intento por hacer la interpretación de los datos de potencial espontáneo mediante un plano de configuración de curvas isopotenciales, al aplicarse el factor de corrección de los perfiles, se crearon anomalías inexistentes y por lo tanto se procedió a interpretar individualmente las líneas. Se seleccionaron los máximos tomándose como referencia las anomalías mayores o menores de 60 mV y el resultado se muestra en el plano de discontinuidades eléctricas de la figura 6 simultáneamente con los datos de resistividad.

CONCLUSIONES

1. En los perfiles de resistividad, exceptuando el de la línea 21, existen cuatro discontinuidades eléctricas que se han relacionado con efectos de la falla Cerro Prieto. Estas discontinuidades en las proximidades de la falla coinciden con las áreas donde el contacto del resistivo se profundiza aún más formando escalonamientos hacia la falla. Las discontinuidades corresponden con máximos de potencial natural mayores de 60 mv en las líneas 18, 19 y 20. Esto puede ser explicado en función de una mayor actividad electrocinética debida a la permeabilidad resultante de la falla Cerro Prieto. La disminución en el número de discontinuidades y el desplazamiento del máximo de potencial espontáneo en la línea 21 posiblemente se deba a la carencia de permeabilidad y efecto electrocinético.

2. En la parte media SO de la línea 18 se encontró una discontinuidad eléctrica que se ha interpretado como un cambio de facies en las rocas del conductivo, junto con una anomalía positiva menor de 60 mv en el potencial espontáneo. Esta anomalía de autopotencial se puede explicar en función del efecto electroquímico que resulta cuando dos soluciones de diferente concentración salina son puestas en contacto.

3. En la línea B de autopotencial, del kilómetro 4.5 S al 15 S, se presenta un máximo mayor de 60 mv que, con la tendencia suave del incremento de resistividad, se ha relacionado con el flujo de agua subterránea del Río Colorado.

4. En la misma línea B, del kilómetro 25 S al 38 S, se muestra otro gran máximo de potencial natural que, junto con los de los extremos NE de las líneas 20 y 21 se pueden interpretar como originados por la actividad electrocinética del agua somera en las zonas arenosas del Desierto de Altar.

5. En los perfiles 18, 19, 20 y 21, al NE de la falla Cerro Prieto, se presenta otra discontinuidad eléctrica que podría reflejar la existencia de una falla o cambio de facies en los sedimentos, que da como resultado la pérdida del contacto del resistivo profundo en cada una de las líneas. Esto parece corresponder con un incremento de espesores a partir de esa falla y la localización de míni-

mos resistivos muy profundos (del orden de 2500 m) y que se comentara anteriormente.

6. Debido a que las zonas de mínimos resistivos se localizan en los perfiles con las mayores profundidades interpretadas y que esta condición estructural es correlacionable con las anomalías termales definidas con pozos someros, así como con las anomalías de mayor concentración de mercurio, se considera que dichas zonas podrían reflejar alguna actividad termal profunda. Estas zonas con posibilidades geotérmicas se encuentran en un área en la que el escurrimiento subterráneo del Río Colorado cruza con dirección NE-SO y tiene una frontera o barrera impermeable en la falla de Cerro Prieto.

7. La definición de cierta posibilidad geotérmica entre Plan de Ayala, B. C. y Riito, Son. permite recomendar exploraciones geofísicas de detalle antes de realizar cualquier programa de perforación.

REFERENCIAS

- Arellano, G. J. F. y M. A. Razo, *Prospección eléctrica de la porción norte del valle de Mexicali y campo geotérmico de Cerro Prieto, B. C.*, Informe (sin pub.) de CFE, 1978.
- Díaz, C. E., *Informe geológico de Mesa de Andrade*, Informe (sin pub.) de CFE, 1979.
- Díaz Curiel, S., "Estudios de potencial natural al noroeste del Volcán de Cerro Prieto, B. C.", *Primer simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto*, San Diego, 1978.
- Fonseca, L. H. L. y M. A. Razo, *Prospección gravimétrica y magnetométrica en el Valle de Mexicali, B. C.*, Informe (sin pub.) de CFE, 1978.
- Sánchez, R. J. y A. de la Peña, *Estudio preliminar de las concentraciones de mercurio en Cerro Prieto y Mesa de Andrade*, Informe (sin pub.) de CFE, 1979.
- Tesvi Meidav, *Direct current resistivity methods in geothermal exploration*, 1979.
- Puente Cruz, I., *Panorama general de la geología de Cerro Prieto y de los estudios geológicos de la CFE*, Informe interno de CFE, 1979.
- Orellana, E. y H. Mooney, *Tablas y curvas patrón para sondeos eléctricos verticales sobre terrenos estratificados*, 1966.
- Asociación Europea de Geofísica de Exploración, *Standard graphs for resistivity prospecting*, 1969.
- Zohdy, A. A. R., L. A. Anderson y L. J. P. Muffler, "Resistivity, self-potential and induced polarization surveys of a vapor-dominated geothermal system", *Geophysics*, vol. 38, no. 6, 1973, pp. 1130-1144.
- Zablocki, C. H., "Mapping thermal anomalies on an active volcano by the self-potential method, Kilauea, Hawaii", *Proceedings, Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco*, Washington, U. S. Government Printing Office; vol. 2, 1976, pp. 1299-1309.
- Anderson, L. A. y G. R. Johnson, "Application of the self-potential method to geothermal exploration in Long Valley, California", *Geophysics*, vol. 38, no. 6, 1973, p. 1190.
- Combs, J. y M. Wilt, "Telluric mapping, telluric thermal anomaly, Imperial Valley, California", *Proceedings, Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco*, Washington, vol. 2, 1976, pp. 917-928.
- Corwin, R. F. y D. B. Hoover, "The self-potential method in Geothermal Exploration", *Geophysics*, vol. 44, no. 2, 1979, pp. 226-245.

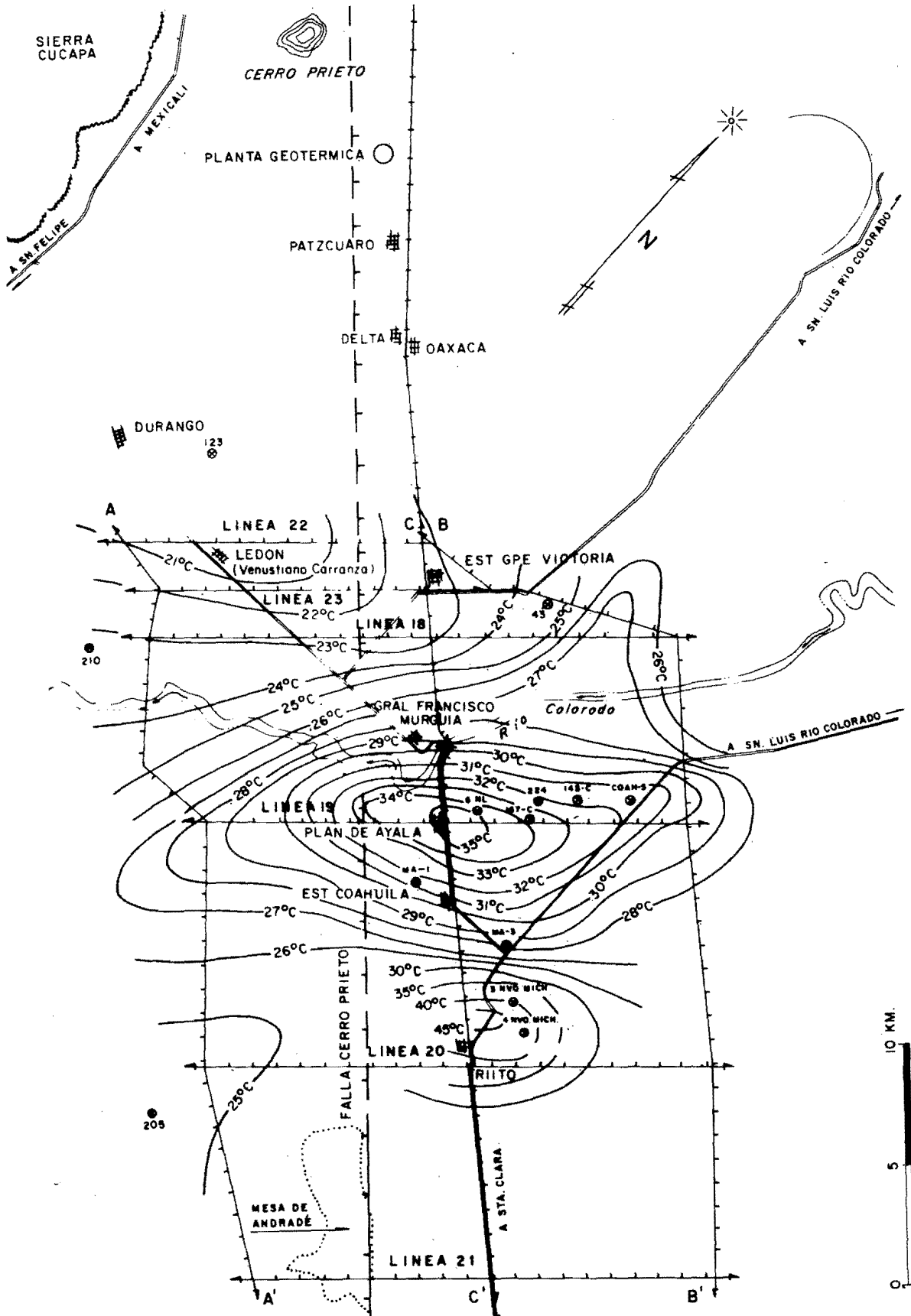


Figura 1. Anomalías termaleas.

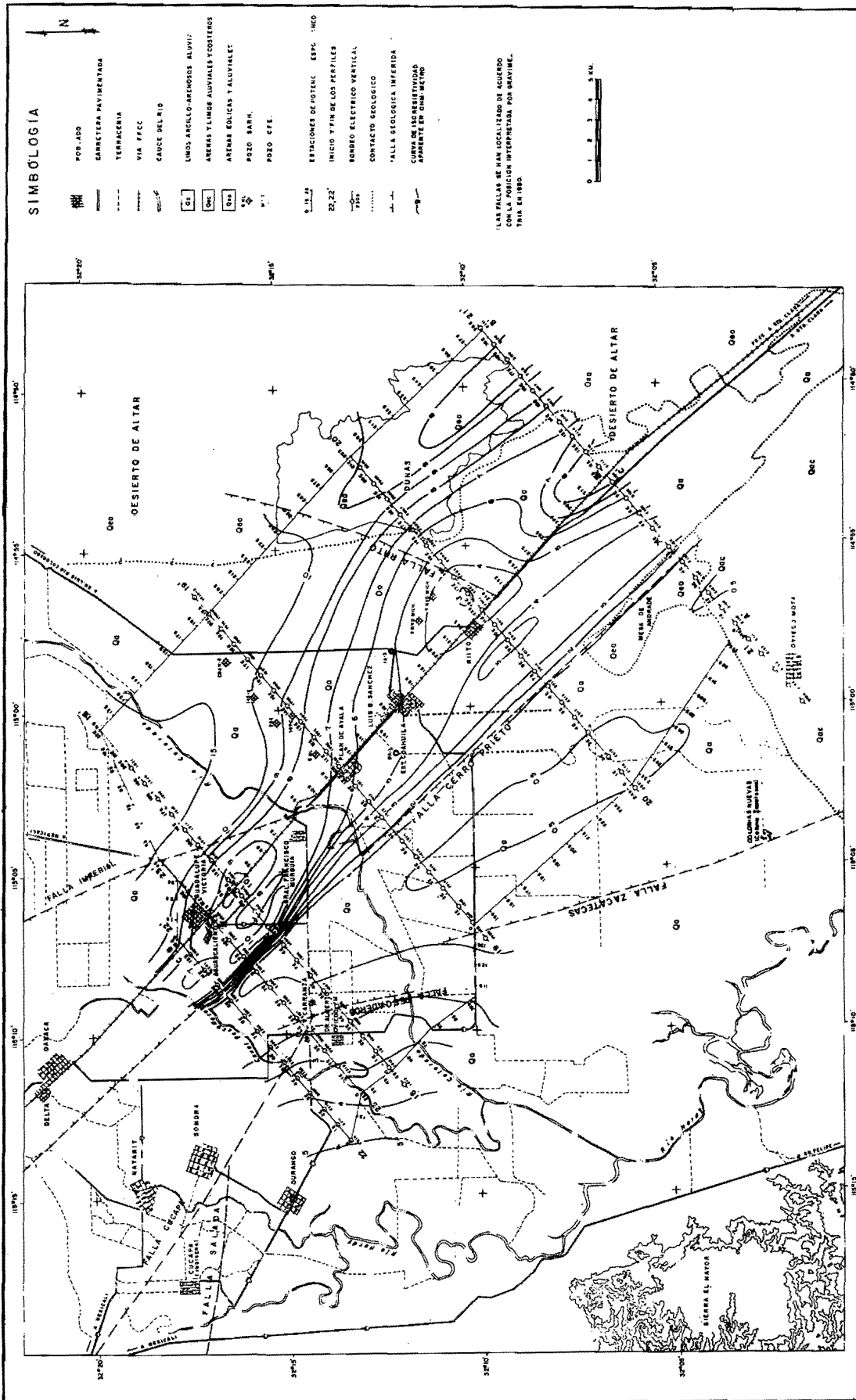
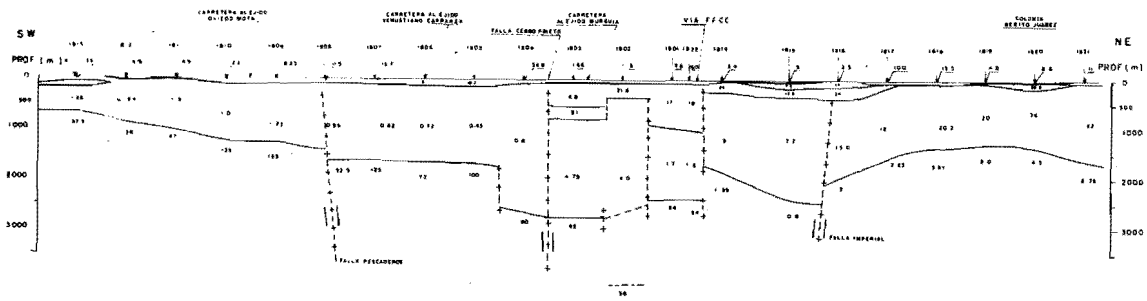
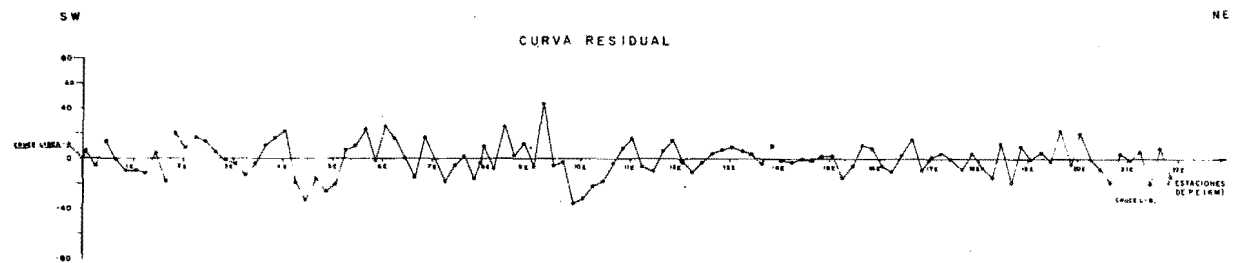
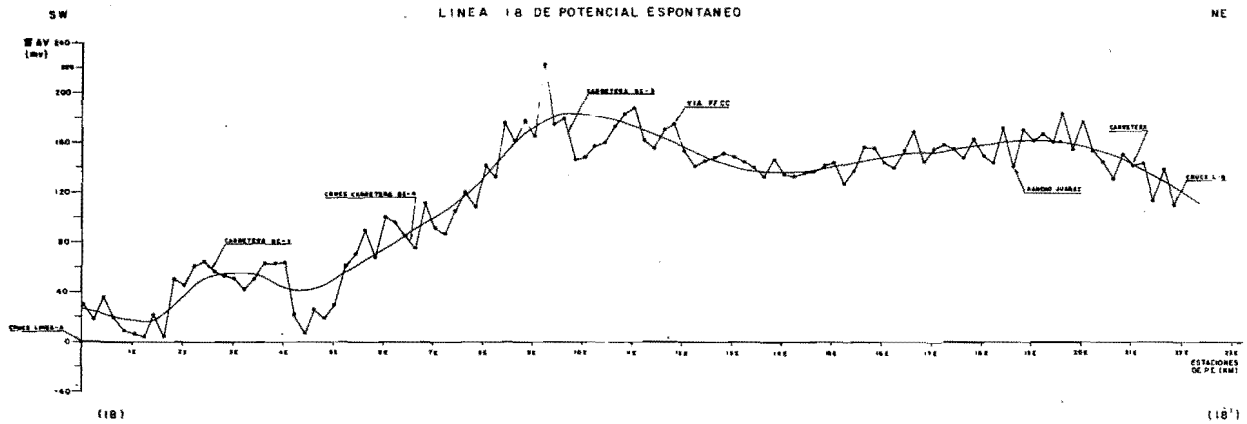
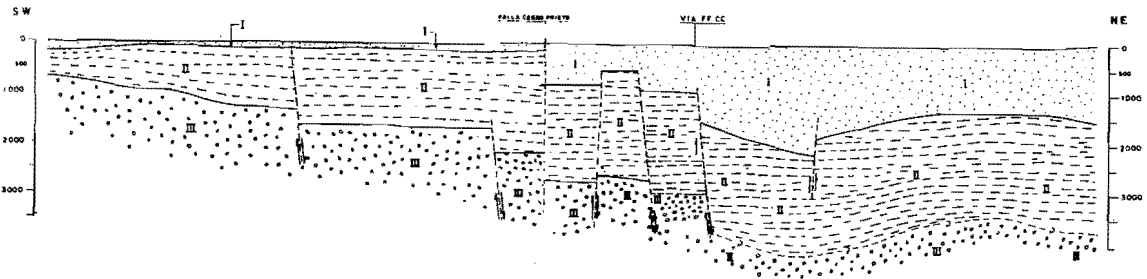


Figura 3. Plano de iso-resistividades aparentes para $AB/2 = 2000$ m.

LINEA N.º 18



ESQUEMA GEOLÓGICO INFERIDO



SIMBOLOGIA

2300 Sondeo Eléctrico Vertical

12 Resistividad en ohm-metro

Interfase eléctrica

Discontinuidad eléctrica o falla

Estaciones de potencial espontáneo

Curva regional

Sedimentos no consolidados (arcillas, arenas y gravas) correspondientes al resistivo superficial

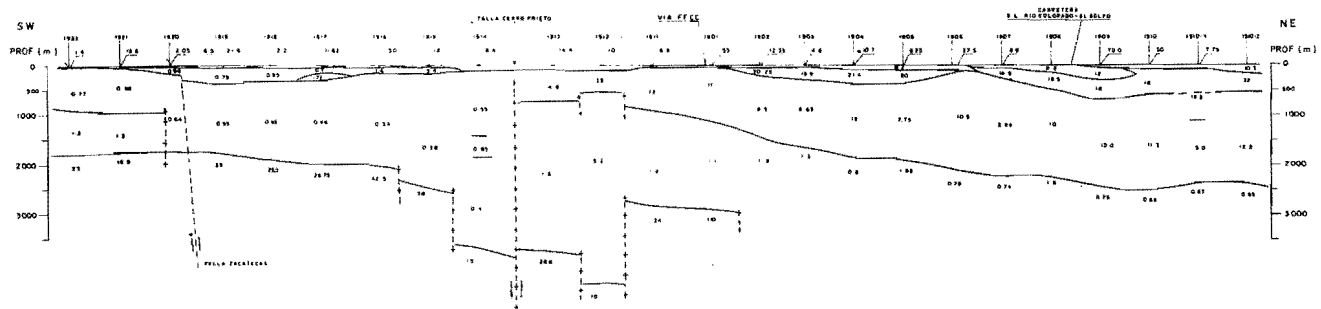
Sedimentos no consolidados (arcillas, arenas y gravas) correspondientes al conductivo

Sedimentos consolidados (lulitas y areniscos) que corresponde al resistivo profunda

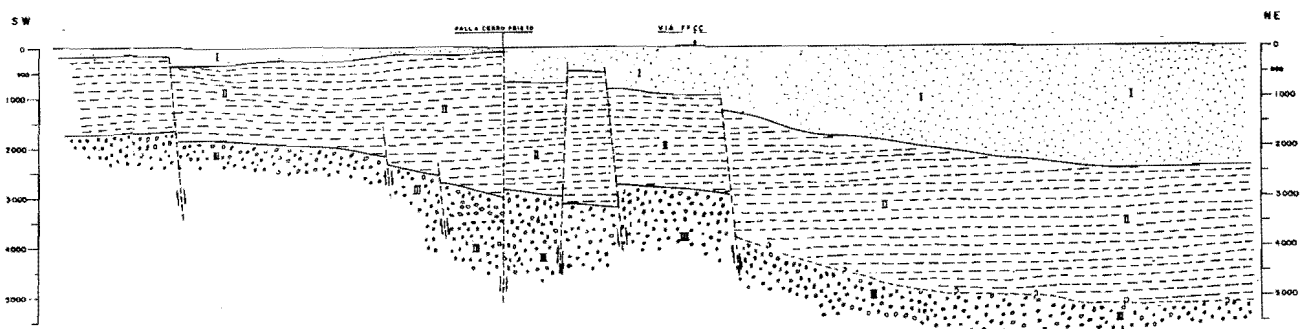
Falla geológica inferida

Figura 4. Secciones electroestratigráficas de potencial espontáneo y bosquejo geológico de las líneas 18 y 19. (1/2)

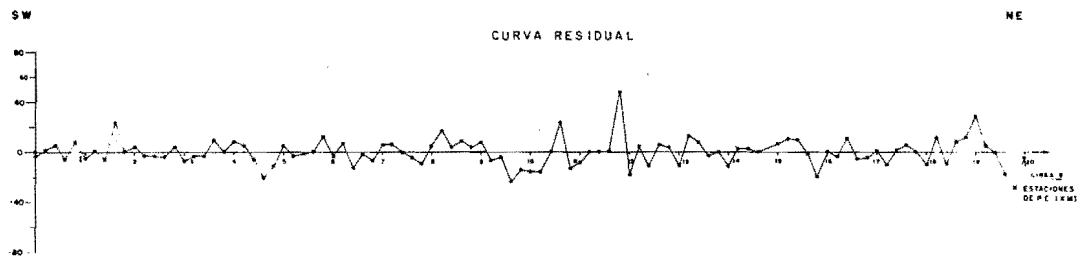
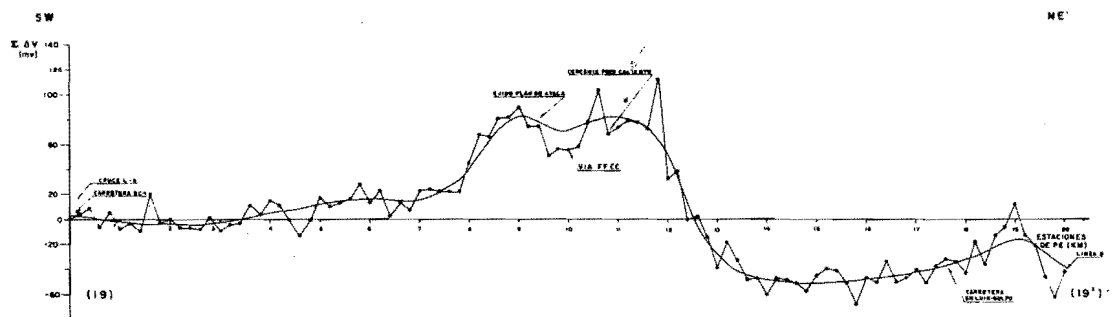
LÍNEA N.º 19



ESQUEMA GEOLOGICO INFERIDO



LÍNEA 19 DE POTENCIAL ESPONTANEO



Los datos se han localizado de acuerdo con la posición interpretada por gravimetría en 1980.

Estudio geofísico realizado por la oficina de exploraciones geofísicas de la C.F.E., para la coordinadora ejecutiva de Cerro Prieto.

Figura 4. (2/2).

0 500 1 2.5 KM

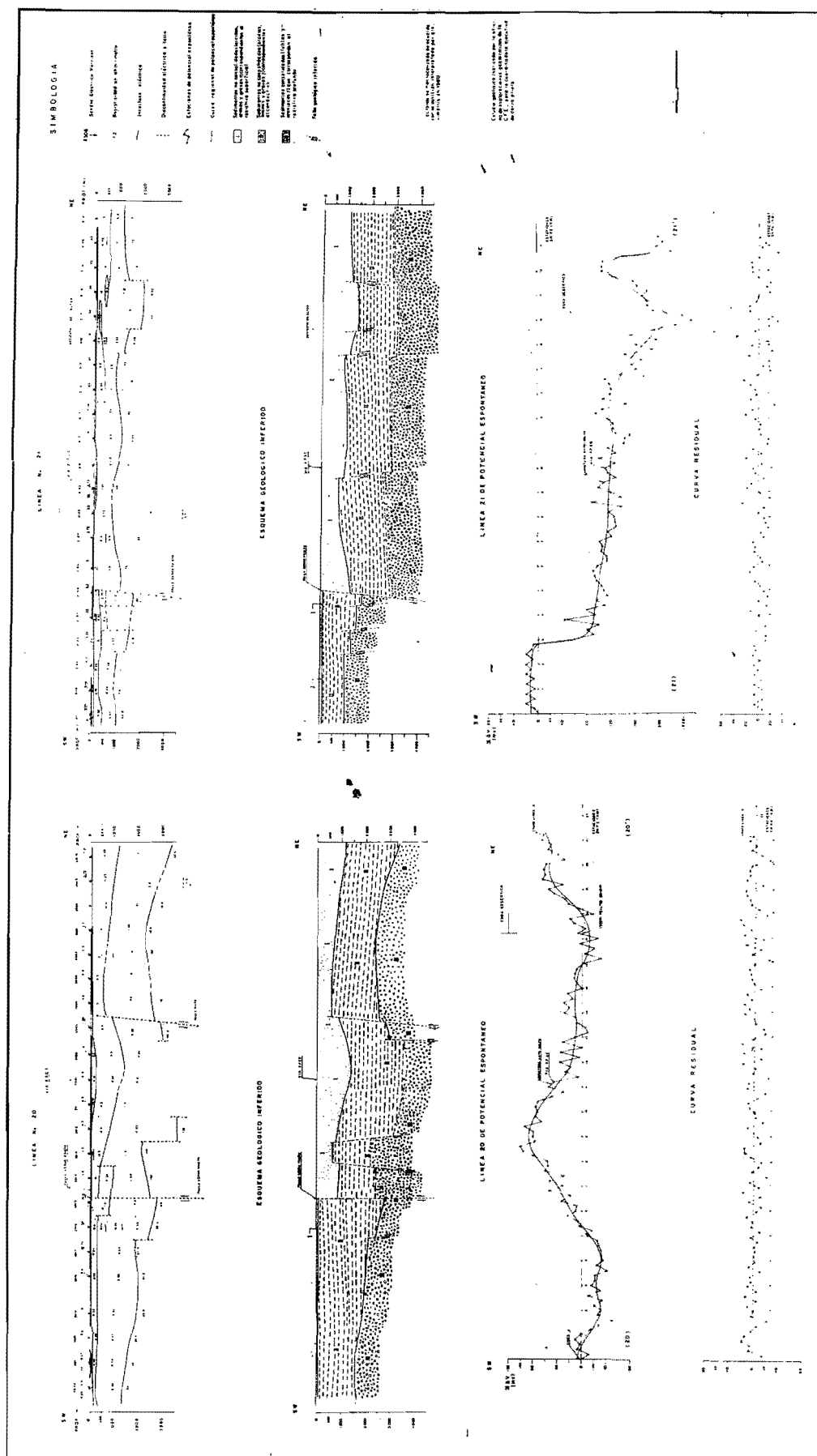


Figura 5. Secciones electrostratigráficas de potencial espontáneo y bosquejo geológico de las líneas 20 y 21.

Figura 6. Plano de discontinuidades eléctricas y anomalías de potencial espontáneo.

RESISTIVITY AND SELF-POTENTIAL STUDY IN THE SOUTHERN PART OF THE MEXICALI VALLEY

INTRODUCTION

In order to obtain information about the geothermal possibilities in the Southern part of the Mexicali Valley, the Comisión Federal de Electricidad has performed complementary geological, geochemical and geophysical studies in an area covering approximately 600 km² located between Mesa de Andrade and Estación Guadalupe Victoria, B. C. (Fig. 1). The geothermal activity in this area is characterized by the presence of abnormal water temperatures, ranging from 35° to 45°C, in some of the shallow wells drilled to a depth of 100 m by the Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

The structure of this zone is affected by the Cerro Prieto fault, which can be seen in the surface of the northeastern part of Mesa de Andrade, and in its southeast continuation down to the Gulf of California. The Cerro Prieto geothermal field is located in the northeastern extreme of the fault, thus the thermal activity in the field has been related to the fault.

Based on the geology of the area and on results from the geoelectric study performed in the northern part of the Mexicali Valley, two regional geophysical surveys were programmed by means of electric resistivity and self-potential methods.

One hundred and ten vertical electric soundings were performed for the geoelectric survey, using a Schlumberger arrange with a 10 km maximum spacing between current electrodes ($AB/2 = 5000$ m), in six regional lines approximately 20 km long and with a northeast-southwest strike (lines No. 18, 19, 20, 21, 22, and 23) crossing perpendicularly the Cerro Prieto fault.

To complement the resistivity study a self-potential survey was performed measuring differences in the potential between two non-polarizing electrodes 200 m apart. The "leap frog" technique was followed on the six regional lines and on another three closing loop lines with a length of about 35 km each and a northwest-southeast strike (lines A, B, and C).

GEOLOGY

This area is made up of metamorphic, intrusive igneous and sedimentary rocks. In Sierra del Mayor there are intrusive igneous and metamorphic rocks constituted by granites, granodiorites, gneises and schists, integrating

what is known as the granitic basement of the Upper Cretaceous; on this basement lie, discordantly, sedimentary rocks.

The sedimentary rocks are predominantly made up of new clastic rocks differentiated only by the way in which they were deposited (Fig. 2). The rocks are:

Clayish-sandy silt of alluvial origin that constitutes the agricultural soil in Mexicali Valley

Silts and sands of alluvial and coastal origin that were deposited by the interaction between the flux of the Colorado River and the tides of the Gulf of California

Sands of eolic and alluvial origin from the Desierto de Altar (Díaz Cabral, 1979).

From the tectonic point of view the region is located within the zone influenced by the San Andres System, whose main exposed fault is the Cerro Prieto fault. Other faults, like Cucapa, Laguna Salada and Imperial (the former two observed in the Cucapa Range), have been inferred in the region by means of gravimetric interpretation (Fonseca, H. and Razo, M. A., 1978).

According to the drillings performed at the Cerro Prieto field, three units that constitute the generalized lithologic column of the Mexicali Valley have been defined. These are described as follows:

UNIT A:

It is integrated by unconsolidated deltaic sediments (clays, silts, sands and gravels) that are susceptible to accept tectonic stresses of small magnitude. This sedimentary package is known as unconsolidated sediments.

UNIT B:

It is constituted by consolidated sediments (shales and sandstones) partly metamorphosed that underlie unit A. This unit, though apparently rigid, can withstand some kind of stresses, but fractures in some occasions.

UNIT C:

It is represented by the granitic and metasedimentary basement (Puente, I., 1978).

PREVIOUS WORK

From temperature data collected in the shallow wells, SARH drew a chart of isotherms (Fig. 1) where two temperature maximas can be seen (35°C and 45°C). They are located at Plan de Ayala, B. C. and Riito, Son., respectively.

In order to determine the source of thermal flux to the SARH wells, the CFE programmed four wells 250 m deep, named MA-2, MA-4, MA-1, and MA-3; to date, only the last two have been drilled. The well logs corresponding to these wells indicate downhole temperatures of 28°C and 31°C, which are considered normal, without providing evidence about the thermal flux direction.

With respect to geochemical studies, CFE performed thirty measurements of mercury vapor concentrations distributed in an area of 150 km² that includes the thermal anomalies from the town of Murguía to Riito, Son. (Sánchez, J. and de la Peña, A., 1979). This method is based theoretically on the mercury vapor emanations that could be related to geothermal zones and that rise to the surface through faults or fractures. Four zones with anomalous mercury content in the same areas that have thermal anomalies were found with these measurements.

RESISTIVITY STUDY

The electric resistivity method is a geophysical technique that allows determination of the resistivity distribution in subsurface rocks. The electric resistivity of the rocks is known to be affected by different factors, such as temperature, porosity, degree of saturation, salinity of the saturating fluid, geometric factor of porous space, and rock matrix conductivity (Meidav, T. *et al.*, 1976). In the case of the Mexicali Valley, it has not been possible to distinguish the temperature effects from those of the porosity or salinity; therefore, the resistivity studies would be useful in localizing geothermal zones only by the dependence between resistivity lows and geological structures linked to some thermal activity.

The emission and reception equipment used in this resistivity study were an induced polarization Scintrex transmitter with a power of 15 kW and a high impedance voltmeter respectively.

The curves resulting from vertical electric soundings were interpreted by graphically comparing the field curves to those from the collection of pattern curves by E. Orellana and Mooney (1966), and to those edited by the European Association of Geophysical Exploration (1969). The technique of the auxiliary point method was used. A computer program was used to verify the graphic interpretation.

The resistivity study results are presented as apparent isoresistivity configuration charts, electrostratigraphic sections and a chart of the electric discontinuities determined in this study.

APPARENT ISORESISTIVITY CONFIGURATIONS

Figure 3 shows the apparent isoresistivity configuration chart for values of $AB/2 = 2.0$ km. A clear relation between the geological-structural conditions and the apparent resistivity distribution can be seen in this chart. The following general conclusions can be inferred:

1. The presence of the Cerro Prieto fault is observed in terms of a marked gradient of isoresistivity curves with a northwest-southeast trend which runs parallel to the railroad tracks at a distance of between 3 and 5 km.

2. Throughout the whole southwest region of the Cerro Prieto fault a resistivity minimum is shown with values from 0.5 to 2 ohm-m. This minimum is spread out in a band approximately 10 km wide that runs parallel to the fault and has its northwest extreme close to the Gulf of California.

3. There is a slight resistivity increase to the west of Colonia Carranza (from 2 to 5 ohm-m). This increase and the shape of the isoresistivity configuration have been related to the subsurface rocks, which are a prolongation of Sierra Cucapa below the alluvial deposits.

4. In the soundings 1802, 1801, and 1814, a high resistivity zone located to the south and southeast of the town Guadalupe Victoria is emphasized. This high resistivity zone, with values of up to 10 ohm-m, presents the same northwest-southeast trend as the main structural system affecting the zone. Its elliptic shape covers approximately 20 km² and probably has its southeast extreme in the outskirts of the town Francisco Murguía, therefore lying between the Cerro Prieto fault and the inferred prolongation of the Imperial fault.

5. To the northeast of this maximum another one can be observed with values up to 20 ohm-m, forming the most resistive zone of the region under study. This maximum is probably structurally related to the subterranean action of the Colorado River.

6. A relative minimum with values of 3 ohm-m is observed in the Riito region.

ELECTROSTRATIGRAPHIC SECTIONS

The quantitative interpretation of vertical electric soundings is shown by means of electrostratigraphic profiles; with these profiles geological outlines have been elaborated for each of the sections. Figures 4 and 5 show profiles for lines No. 18, 19, 20, and 21, from which the following conclusions are obtained:

1. The effect of the Cerro Prieto fault, with a strike approximately N 45°W, is noticeable in all the

profiles, causing abrupt changes in the calculated resistivities and depths.

2. There are basically three electrostratigraphic units in every section. The first unit is made up by different surface layers with a wide range of resistivity values (1 to 48 ohm-m) and of thickness (from 5 m to 600 m, and up to 2500 m in some places). This first unit, known as the surface stratum, is interpreted as part of the clay, silt, sand and gravel sequence of deltaic origin (unconsolidated sediments) with some zones saturated with water having variable saline content.

3. The second unit underlies the surface stratum and is made up of a conductive stratum varying in thickness from 500 m to 2500 m (up to 3500 m in some regions) and with resistivities smaller than 50 ohm-m. This conductive horizon can be correlated with a part of the unconsolidated sediments, with a different electric behavior due to an increase in salinity. In line 18 the thickness of this layer decreases gradually southwest of the Cerro Prieto fault, with a slight resistivity change between values smaller and greater than 1 ohm-m. This is attributed to changes of facies or to differences in salinity. The part with values smaller than 1 ohm-m, located southwest of the Cerro Prieto fault, corresponds to the resistivity minimum observed in the apparent isoresistivity charts. It should be noted that on lines 20 and 21 the conductive stratum presents values smaller or slightly larger than 1 ohm-m due to the influence of the sediments on which the effects of the intrusion of salt water from the California Gulf is more evident.

4. In the southwest part of the Cerro Prieto fault a third horizon was detected under the conductive stratum. It has been named deep resistive stratum and presents resistivities ranging from 10 to 370 ohm-m. It has not been possible to determine its thickness. As shown in the interpretation of vertical electric soundings in the production zone of the Cerro Prieto field, where the same geoelectric units were found, the deep resistive horizon seems to correspond to Unit B, that is, to the consolidated deltaic sediments (shales and sandstones).

5. Analyzing the electrostratigraphic sections, some discontinuities in the resistivity distribution and their depths have been found in the different geoelectric units. Thus, it is observed that in the surface stratum the thicknesses and resistivities increase to the northeast of the sections, reaching depths of 2500 m and resistivities of 48 ohm-m. This seems to be related to a greater package of clastic porous rocks having smaller salt content due to the contribution of Colorado River subsurface waters.

6. To the northeast of the Cerro Prieto fault and underlying the surface resistive horizon appears the conductive stratum with resistivities ranging from 1 to 5 ohm-m. This is assumed to be the same conductive horizon found on the other side of the fault. As mentioned, this stratum shows a greater thickness than that

calculated for the southwest region, and the top of the deep resistive stratum is only detected in some parts along line 20, at depths between 2200 and 3200 m. Within the conductive horizon a low resistivity zone is shown with values smaller than 1 ohm-m at a depth of 2500 m, in the vicinity of sounding 1815 of line 18. In line 19 this minimum was detected between soundings 1904 to 1910-2, with depths that range between 1750 m and 2500 m. For line 20 it was detected between soundings 2012 to 2003, with 5 km of lateral extension and at depths greater than 1000 m and 1750 m.

SELF-POTENTIAL STUDY

Self-potential anomalies apparently related to geothermal activity have been reported recently in the technical literature (Zohdy, Anderson, and Muffler, 1973; Zablocki, 1976; Anderson and Johnson, 1973; Combs and Wilt, 1976; Corwin and Hoover, 1979). Although the electrochemical mechanism involved in the generation of self-potential is not well-understood, it is assumed to be directly related to the electrokinetic and thermoelectric couplings of geothermal reservoirs. Since a geothermal system is usually characterized by the presence of hot circulating fluid, it is assumed that high temperature and fluid movement in a porous environment are able to generate the potential fields observed in the surface.

RESULTS

Profiles constructed with field data collected on lines 18, 19, 20 and 21 are shown, together with part of the electrostratigraphic sections, in Figures 4 and 5 where it is possible to observe that the noise level (residual) behaves in a general way, varying approximately 40 mv in all the study lines.

In attempting to interpret the self-potential data by means of an isopotential curve configuration plane, a correction factor was applied to the profiles creating non-existent anomalies, so the lines were interpreted individually. Maximums were selected taking as a reference anomalies greater or smaller than 600 mv; the results are shown on the electric discontinuity chart in Figure 6 along with resistivity data.

CONCLUSIONS

1. In the resistivity profiles, with the exception of that corresponding to line 21, there are four electric discontinuities that have been related to Cerro Prieto fault effects. These discontinuities in the vicinity of the fault coincide with areas where the contact of the resistive horizon deepens even more, forming steps towards the fault. These discontinuities correspond to self-potential maximums greater than 60 mv on lines 18, 19, and 20. This could be explained in terms of a greater electrokinetic activity due to permeability re-

sulting from the Cerro Prieto fault. The decrease in the number of discontinuities and the shifting of the self-potential maximum on line 21, is probably due to lack of permeability and to the electrokinetic effect.

2. An electric discontinuity was found in the middle southwest part of line 18. It has been interpreted as a change of facies in the conductive rocks together with a positive anomaly smaller than 60 mv in the self-potential. This self-potential anomaly can be explained in terms of the electrochemical effect resulting when two solutions different in saline content are put in contact.

3. On self-potential line B, from kilometer 4.5 S to 15 S, there is a maximum greater than 60 mv that together with the slight trend of the resistivity increase has been related to the Colorado River subsurface waterflow.

4. On the same line B, from kilometer 25 S to 38 S, another important self-potential maximum is shown that, together with the northeast extremes for lines 20 and 21, can be interpreted as originated by the shallow water electrokinetic activity in the sandy zones of Desierto de Altar.

5. In profiles 18, 19, 20 and 21, northeast of the Cerro Prieto fault, another electrical discontinuity appears which could reflect the existence of a fault or change of facies in the sediments resulting in loss of the deep resistive contact in each of the lines. This seems to correspond to an increase in thickness from that fault

and with the location of very deep (about 2500 m) resistive minima mentioned before.

6. Since the resistive minimum zones are localized on profiles with the greater interpreted depths and since this structural condition can be correlated to thermal anomalies defined in shallow wells as well as anomalies of greater mercury concentration, it is assumed that such zones could reflect some deep thermal activity. The zones with geothermal possibilities are located in an area where subsurface flow of Colorado River water crossing in a northeast-southwest direction encounters an impermeable barrier or frontier in the Cerro Prieto fault.

7. The definition of some geothermal possibility between Plan de Ayala, B.C. and Riito, Son., allows us to recommend detailed geophysical explorations before performing any drilling program.

FIGURE AND TABLE CAPTIONS

- Figure 1. Thermal anomalies.
- Figure 2. Surface geology of Mesa de Andrade.
- Figure 3. Apparent isoresistivity chart for $AB/2 = 2000$ m.
- Figure 4. Electrostratigraphic sections of self-potential and geologic profiles of lines 18 and 19.
- Figure 5. Electrostratigraphic sections of self-potential and geologic profiles of lines 20 and 21.
- Figure 6. Map of electrical discontinuities and self-potential anomalies.