

GEOLOGIA DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

I. Puente C. y A. de la Peña L.
Comisión Federal de Electricidad
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto
Mexicali, Baja California, México

I. INTRODUCCION

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 actualmente fuerte impulso a la investigación, con el fin de aprovechar los energéticos renovables y en este caso la explotación del vapor endógeno como fluido para la generación de energía eléctrica tan escasa en la porción noroeste de nuestro país, donde la naturaleza difícilmente nos impide la construcción de hidroeléctricas, pero afortunadamente nos ha proporcionado dos energéticos renovables, como lo son el vapor endógeno que se extrae de las profundidades de la tierra y en un futuro no lejano, la posible instalación de plantas eléctricas en base a la captación de los rayos solares.

La Comisión Federal de Electricidad, en representación del Gobierno Mexicano, dispuso hacer partícipe de nuestras investigaciones geotérmicas, a otros miembros de la Comunidad Geotérmica Internacional. En base a lo anterior, se celebró un convenio en el año de 1977, con el Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica, con el fin de compartir experiencias en áreas de investigación que comprenden: geología, geofísica, geoquímica, movimientos corticales, e ingeniería de yacimientos, con el fin de conocer y explotar razonablemente el vapor endógeno del Campo Geotérmico de Cerro Prieto.

II.- GEOLOGIA GENERAL

El campo actual de explotación, está ubicado en la planicie aluvial del Valle de Mexicali, constituida en partes por sedimentos Cuaternarios de pie de monte de la Sierra de los Cucapah y deltaicos depositados por las corrientes divagantes del Río Colorado, siendo la única prominencia dentro del Valle, el volcán riodacítico de Cerro Prieto que data de hace menos de 700,000 años. Los depósitos Cuaternarios están sobreyaciendo a sedimentos Cenozoicos metaformizados, los que a su vez sobreyacen discordantemente sobre el basamento granítico y metasedimentario del Cretácico Superior (Figs. 1 y 2).

III.- TECTONICA

El Campo Geotérmico de Cerro Prieto, se localiza dentro del patrón tectónico denominado San Andrés, del cual se derivan diferentes ramales, siendo al que hemos denominado Cerro Prieto (posible

prolongación de la falla de San Jacinto), donde se localiza la zona geotérmica de Cerro Prieto. Algunos autores, le han denominado a este patrón de fallas del tipo transforme, de las que se derivan centros de dispersión, siendo la evidencia de estos centros, la actividad volcánica reciente, en jambres de temblores, depresiones oceánicas y actividad geotérmica (Figs. 3 y 4).

Debido a que las estructuras geológicas que almacenan los acuíferos de agua caliente y el basamento en el Valle de Mexicali están cubiertas por sedimentos deltaicos no consolidados y semiconsolidados ha sido necesaria la aplicación de diferentes métodos geofísicos, con el fin de conocer el comportamiento y posición, tanto de los sedimentos consolidados, como del basamento granítico y metasedimentario.

Los estudios geofísicos han proporcionado información básicamente del comportamiento estructural del basamento; de los sedimentos Cenozoicos que lo sobreyacen, ha sido escasa, debiéndose comportar estructuralmente éstos en forma semejante pero más compleja por su composición litológica (Figs. 5, 6 y 7).

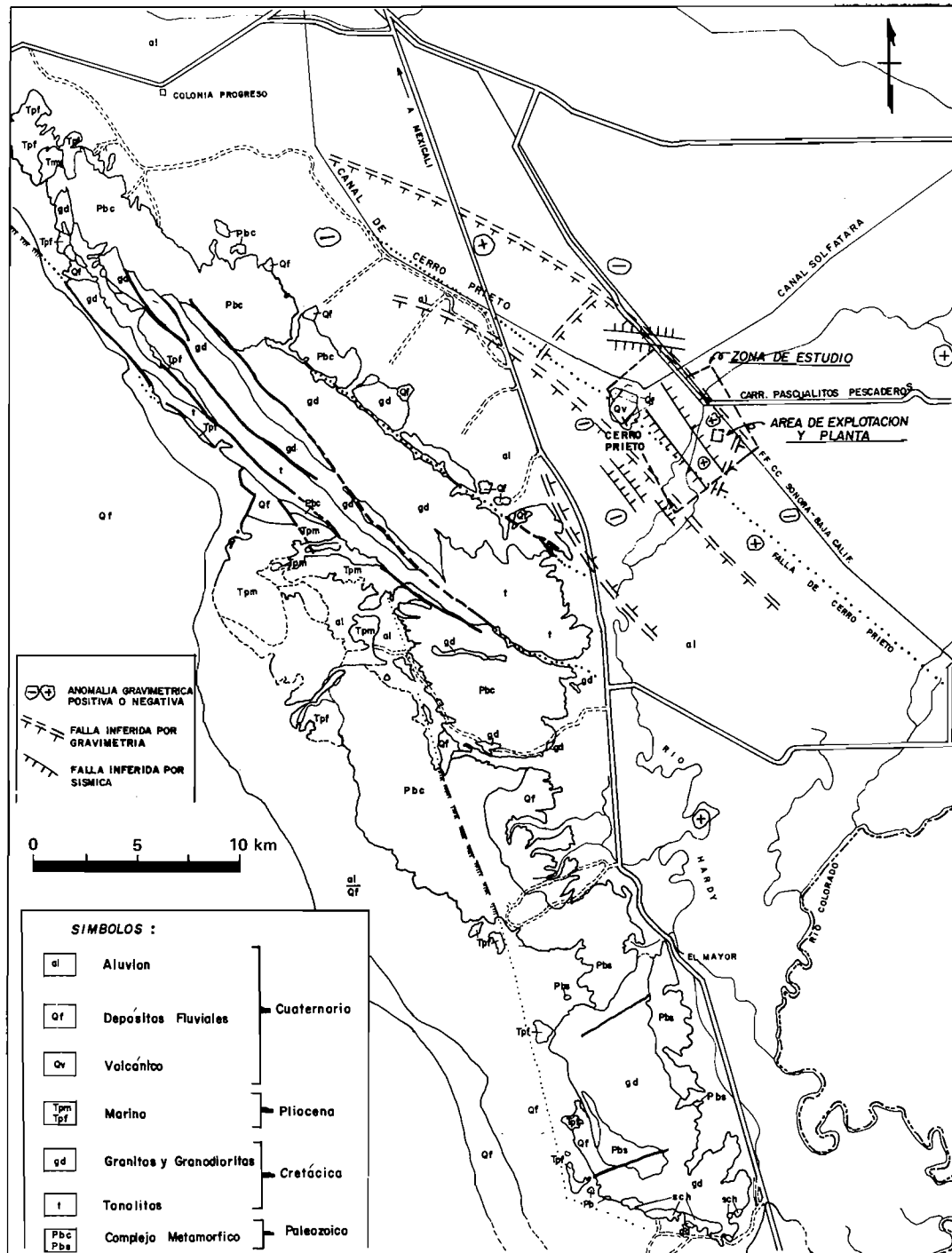
El sistema principal de fallas que hemos denominado Cerro Prieto, tiene rumbo general NW-SE, con echados indistintamente al W y al E, y paralelo a los grandes afallamientos como Imperial, Cucapah, Laguna Salada, Algodones, San Andreas, Elsinora, Banning, Mission Creek y San Jacinto (Fig. 3).

Casi normales al sistema Cerro Prieto, se presentan fallas que hemos denominado Sistema Secundario Volcano, con rumbo predominante SW-NE con echados al NW y al SE. Estos sistemas de fallas combinados, han formado aparentemente una topografía escalonada con prominencias (Horst) y fosas (Grabens).

En base a lo anterior, se ha conceptualizado un modelo geológico, el cual se ha definido como una pirámide escalonada y alargada de NW a SE y recorrida en sus lados W y E (Figs. 8 y 9).

IV.- DESCRIPCION GENERAL DE LAS UNIDADES LITOLOGICAS A, B Y C.

UNIDAD LITOLOGICA A. Compuesta por sedimentos continentales no consolidados y semiconsolidados, a los que se les han asignado una edad Cuaternaria no diferenciada, integrada por arcillas, limos, arenas y gravas en forma repetitiva, habiéndose encontrado en ellos, amazones de gasterópodos de agua dulce (Pozo M-5 a 500 y 800m de profun-



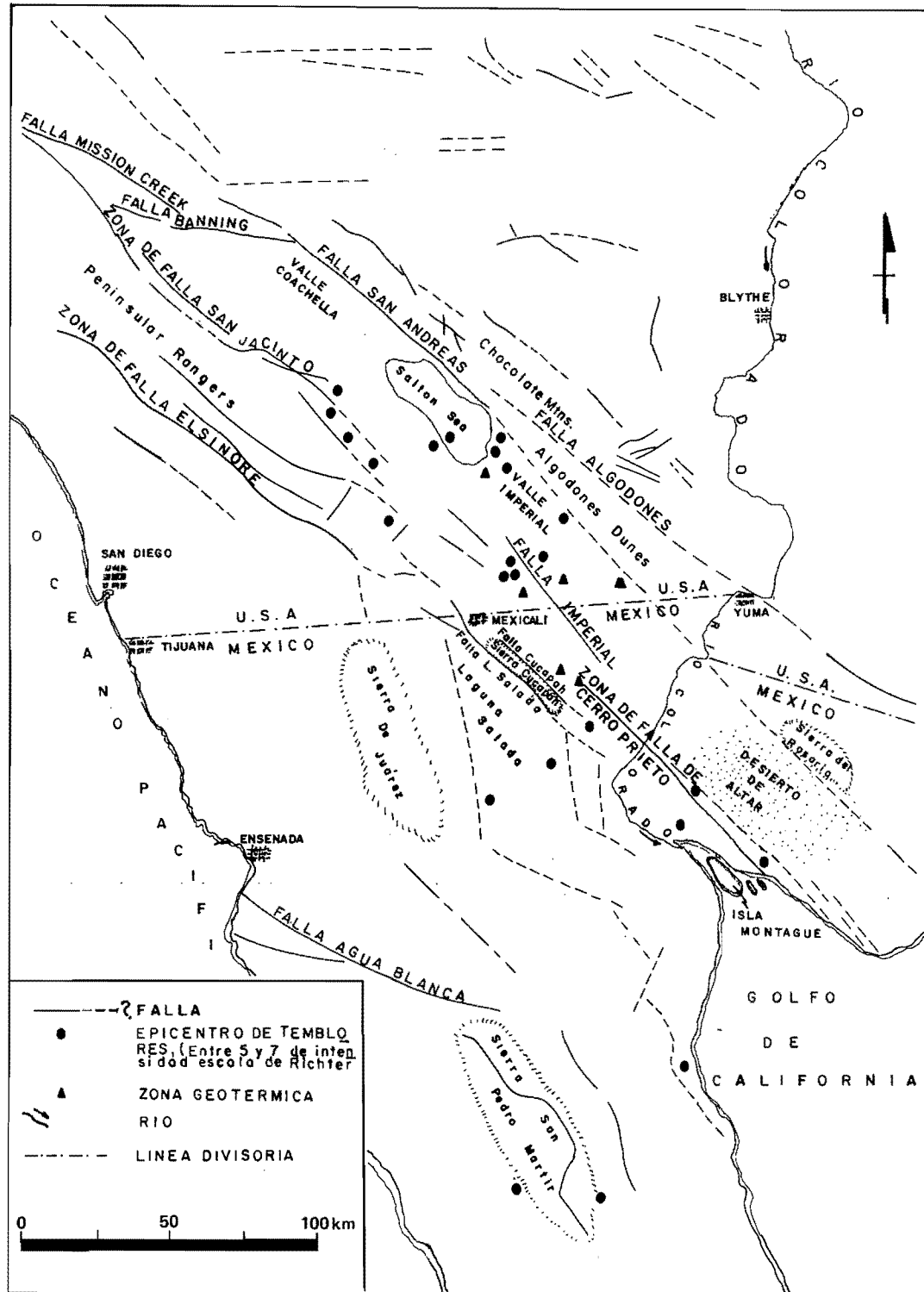
XBL 7811-12840A

Figura 1. Plano geológico del Valle de Mexicali.

	ABANICOS ALUVIALES DE CUCAPAH DE ORIGEN GRANITICO Y METASEDIMENTARIO	R E C I E N T E		C E N O Z O I C A
	ROCAS RIODACITICAS	P L I O P L E I S T O C E N O	C U A T E R N A R I O	
	DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS CONSTITUIDOS POR ARCILLAS, ARENAS Y GRAVAS; CON ESPESORES DE 600 A 2500 m.			
DISCORDANCIA, CAMBIO DE FACIES? O CONTACTO POR METAMORFISMO.		T E R C I A R I O	N O D I F E R E N C I A D O	
LUTITAS DE COLOR CAFE CLARO CAMBIANDO A PROFUNDIDAD A COLORES GRIS CLARO Y GRIS OSCURO, INTERESTRATIFICADAS CON ARENISCAS DE COLOR GRIS CLARO, CONSTITUIDAS DE FRAGMENTOS DE CUARZO Y FELDESPATOS CEMENTADOS INDISTINTAMENTE CON CARBONATOS Y SILICE. SU ESPESOR ES DE 2 000 m. APROXM.				
ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS CONSTITUIDAS POR GRANITO, GRANODIORITAS, GNEISSES Y ESQUISTOS.		C R E T A C I O S U P E R I O R		MESOZOICA

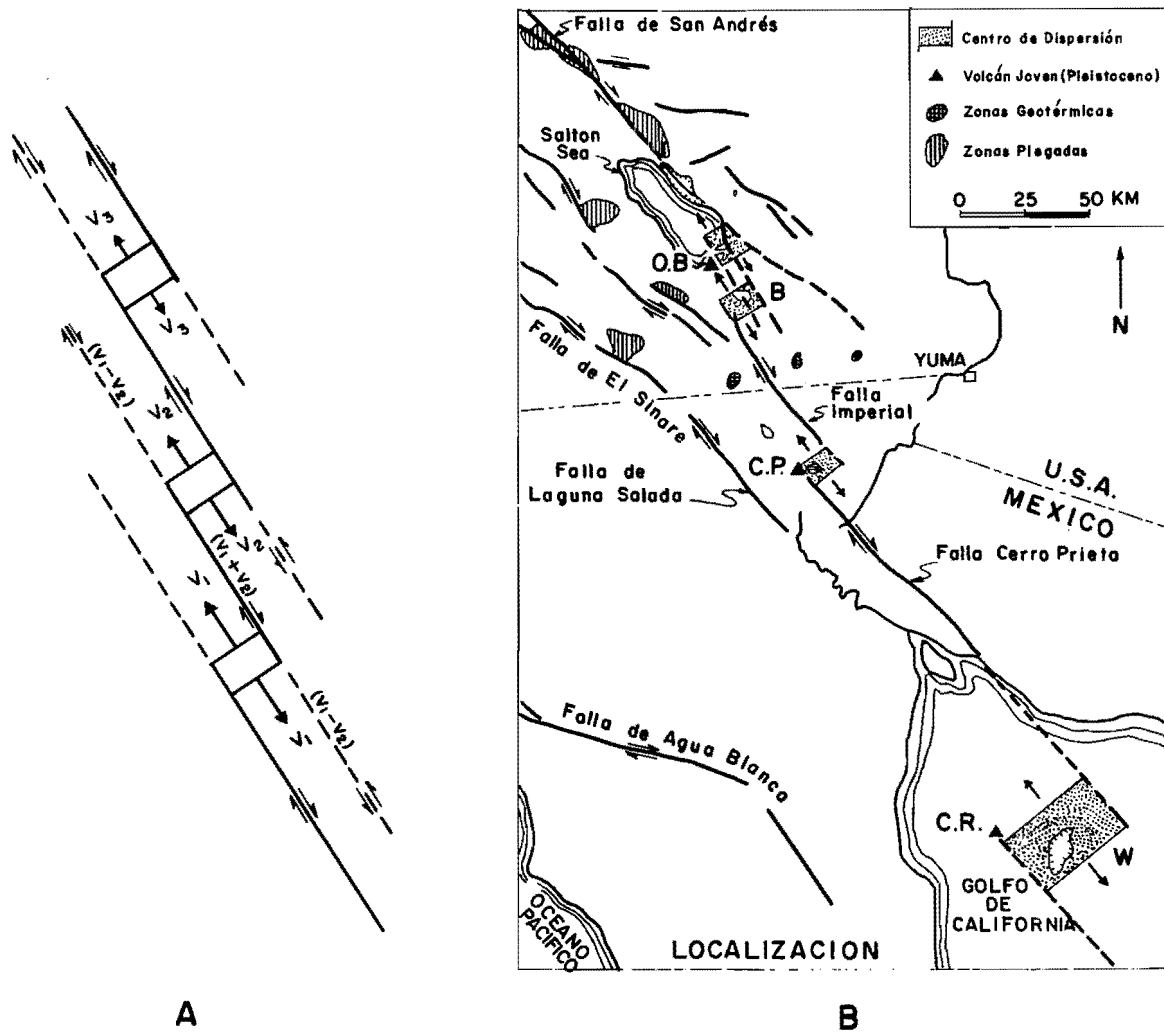
XBL 7811-12841

Figura 2. Columna estratigráfica generalizada del área de Cerro Prieto.



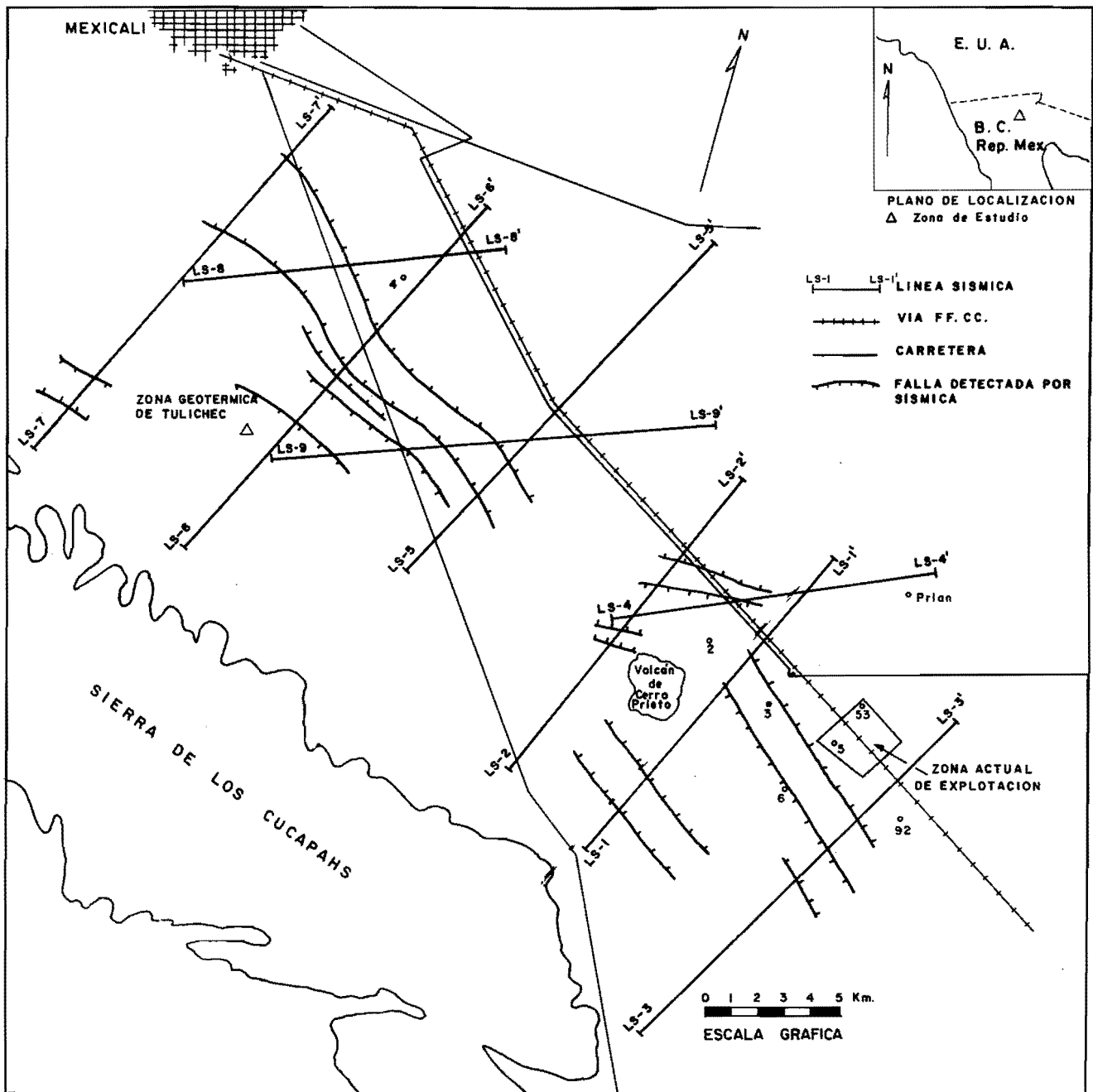
XBL 7811-12842A

Figura 3. Mapa tectónico regional.



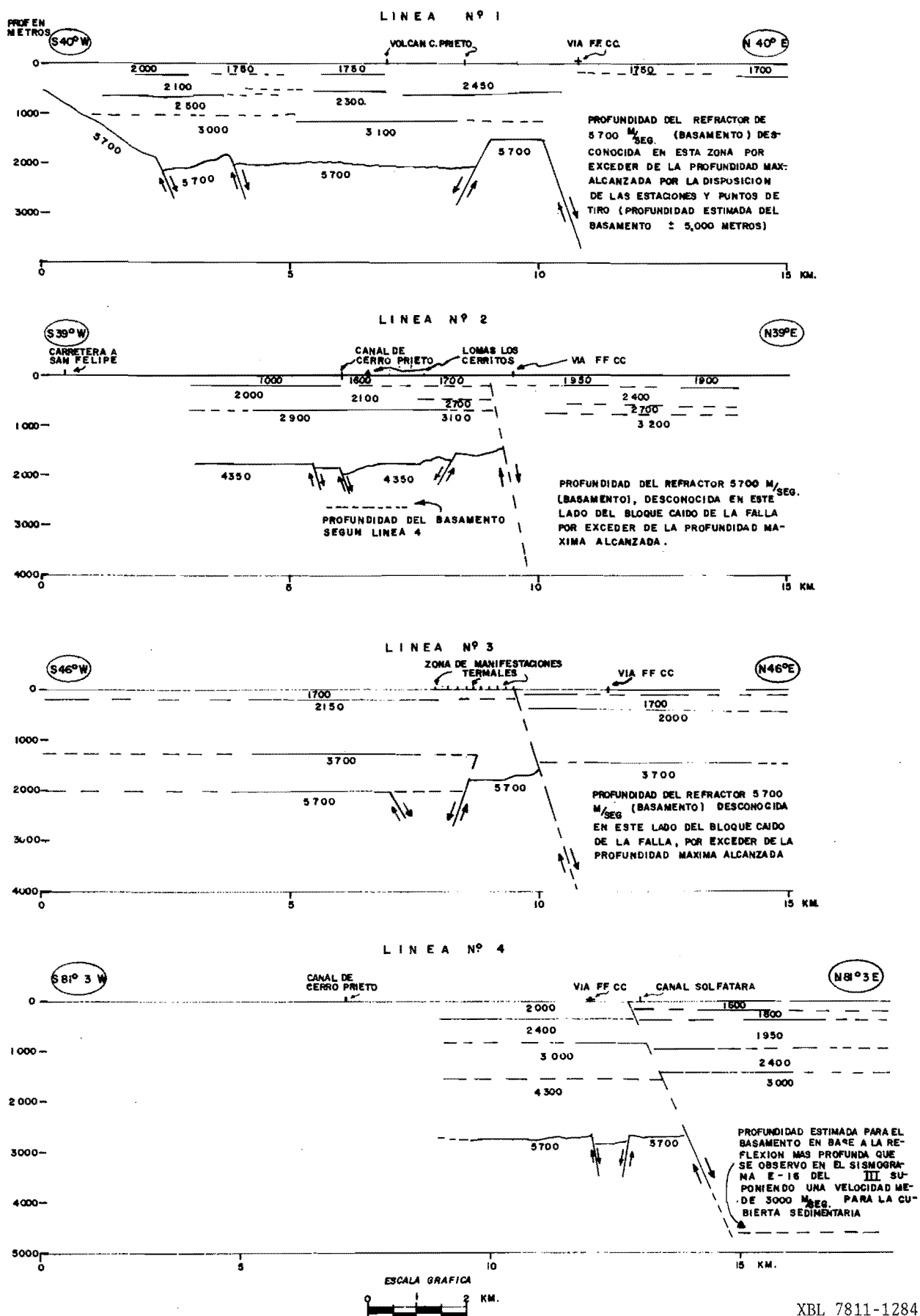
XBL 7811-12843

Figura 4. (A) Modelo de fallas transformes y centros de dispersión propuesto por Lowmiz et al. (1970) y Elders et al. (1972); (B), localización de estas fallas y centros en los Valles Imperial y Mexicali.



XBL 7811-12844

Figura 5. Plano de localización de líneas sísmicas de refracción.



XBL 7811-12845

Figura 6. Secciones sísmicas de refracción 1, 2, 3, y 4, zona de Cerro Prieto.

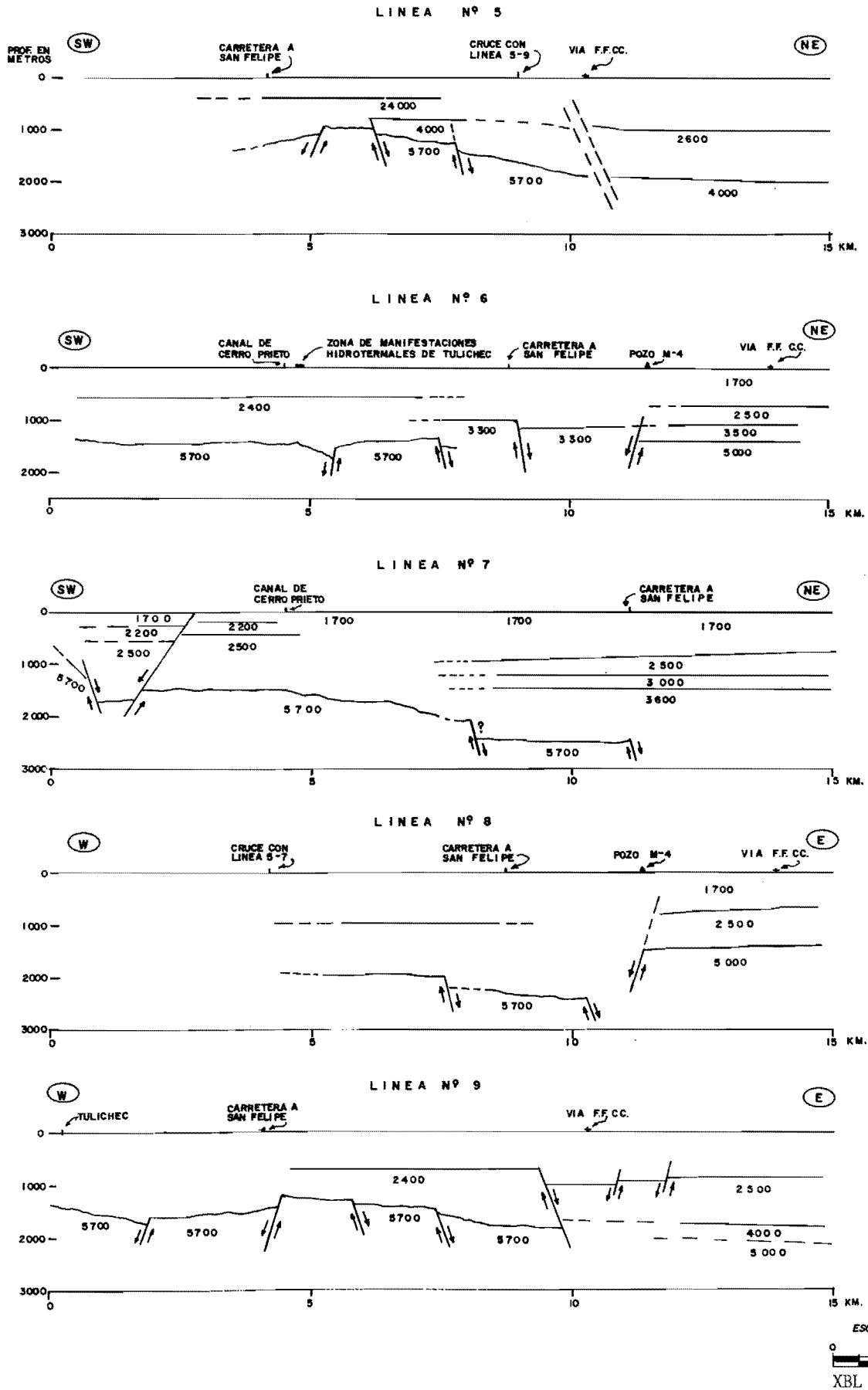
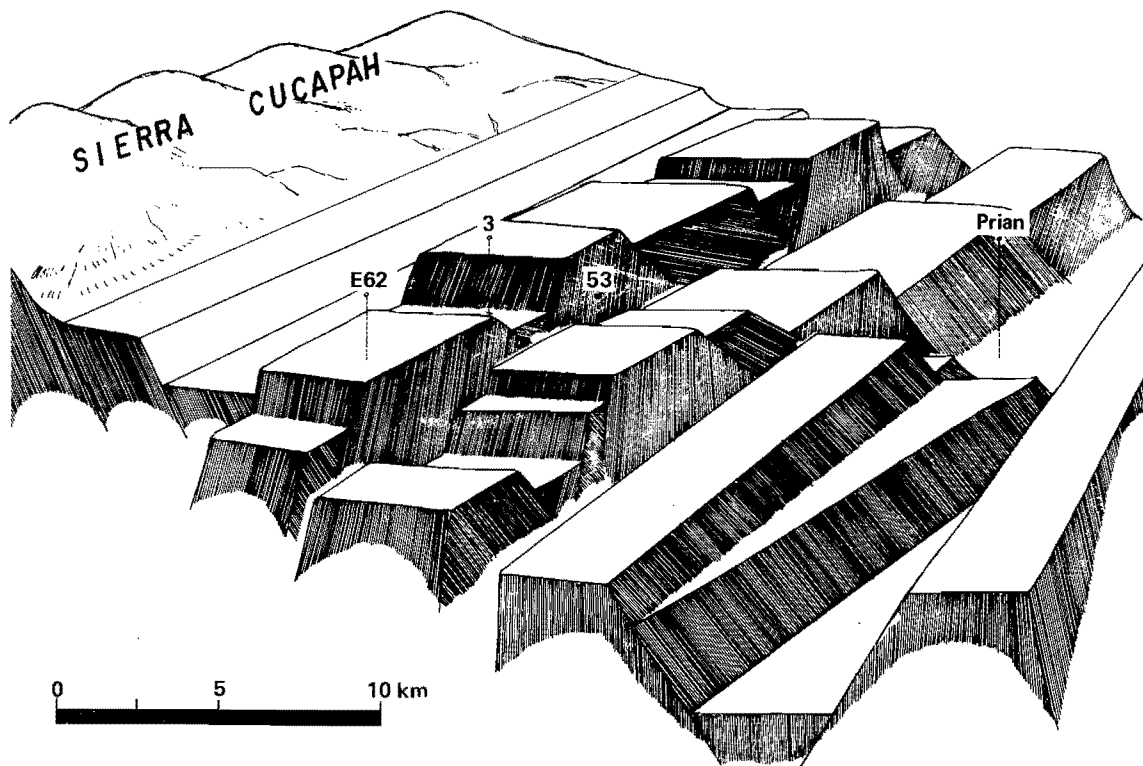


Figura 7. Secciones sísmicas de refracción 5, 6, 7, 8 y 9, zona de Tule Check.



XBL 7811-12847A

Figura 8. Configuración del basamento.

didad), clasificados como del tipo Amnicola, (Alonso 1965). Al fondo y sobreyaciendo a la unidad B, - se presentan regularmente capas de lutitas semiconsolidadas de color café (Fig. 2).

Esta unidad A, por su estado no consolidado y semiconsolidado, debe comportarse plásticamente al ocurrir movimientos telúricos, los que al provocar fracturamientos en los sedimentos son rápidamente cerrados por las arcillas y arenas, no permitiendo el ascenso de los fluidos calientes que contiene la salmuera, siempre y cuando el espesor de la U-A sea suficientemente grueso. El espesor de esta unidad A varía entre 600m (Pozo M-105) a 2215 (Pozo Prian 1).

UNIDAD LITOLÓGICA B.- Está formada por sedimentos deltaicos consolidados del tipo continental y siendo su estratificación generalmente en forma lenticular.

De edad Terciaria (aún no diferenciada), está integrada por una alternancia de lutitas, limolitas y areniscas. Las lutitas y limolitas van de color gris claro a oscuro y ocasionalmente negras y en partes metamorfizadas.

Las areniscas son principalmente de color gris claro, de grano fino bien seleccionado casi siempre, variando entre grauvaca y arcosa, y ocasionalmente a cuarcita (Pozo T-366).

Esta Unidad B, por estar completamente consolidada, ha sido posible observar tanto en los cortes de perforación, como en los núcleos, las

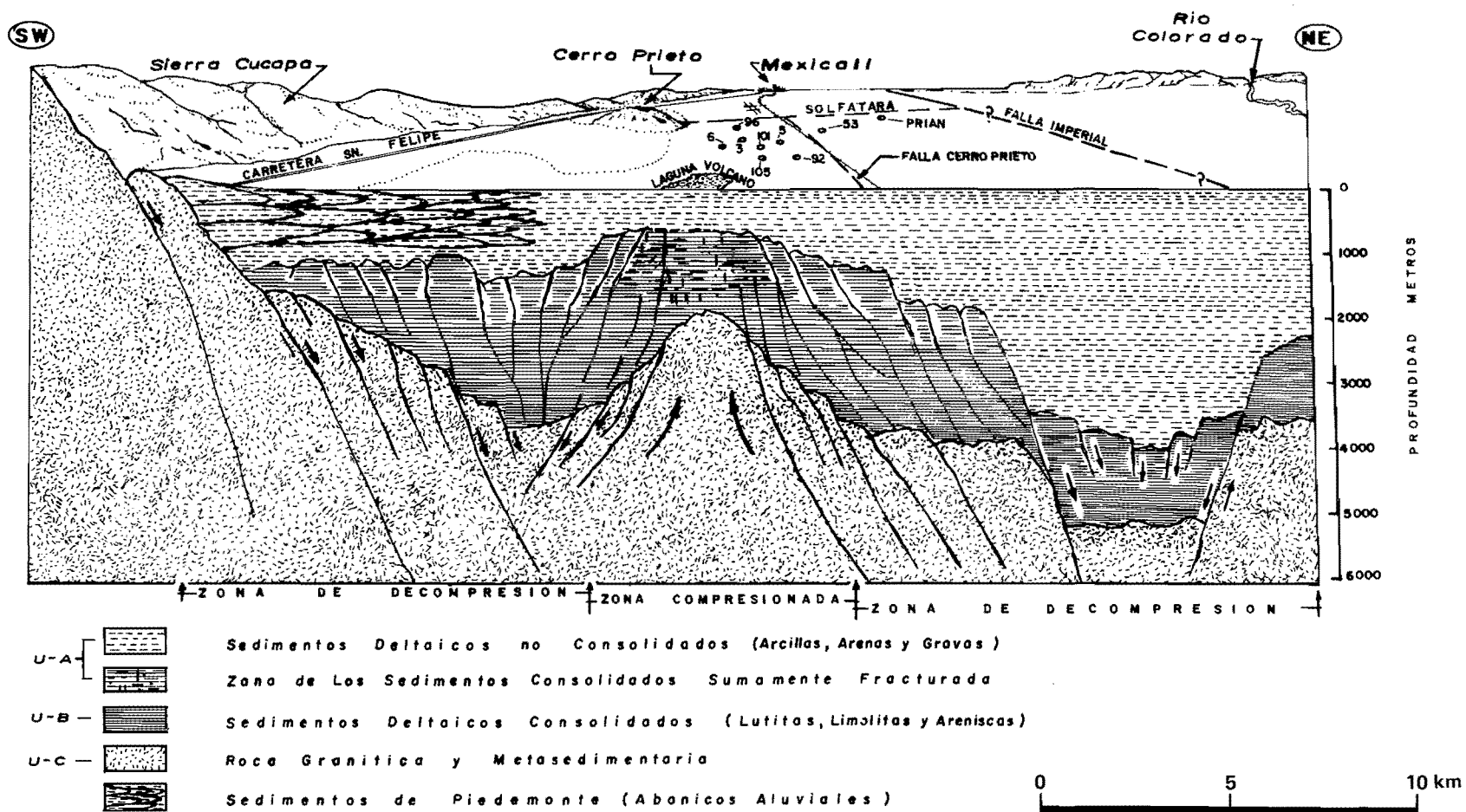
huellas del fracturamiento que tienen las rocas, como consecuencia de los efectos tectónicos ocurridos en la región.

Esta unidad es la que contiene entre sus horizontes permeables a los acuíferos de alta temperatura, considerando que las zonas fracturadas son los conductos principales por los cuales emigran los fluidos de agua caliente, dentro de la salmuera. Se estima su espesor entre 2000 a 2500m.

UNIDAD LITOLÓGICA C.- Se le ha denominado al basamento granítico y metasedimentario del Cretácico Superior, estando representado en superficie, por una mayor parte de las rocas que forman la Sierra de los Cucapa. Esta Unidad C, que forma parte del batolito californiano, ha sido perforada solamente en tres sitios en la zona geotérmica de Cerro Prieto, mediante los pozos M-3, S-262, y M-96, a las profundidades de 2547m, 1478m y 2722 m., respectivamente (Fig. 10).

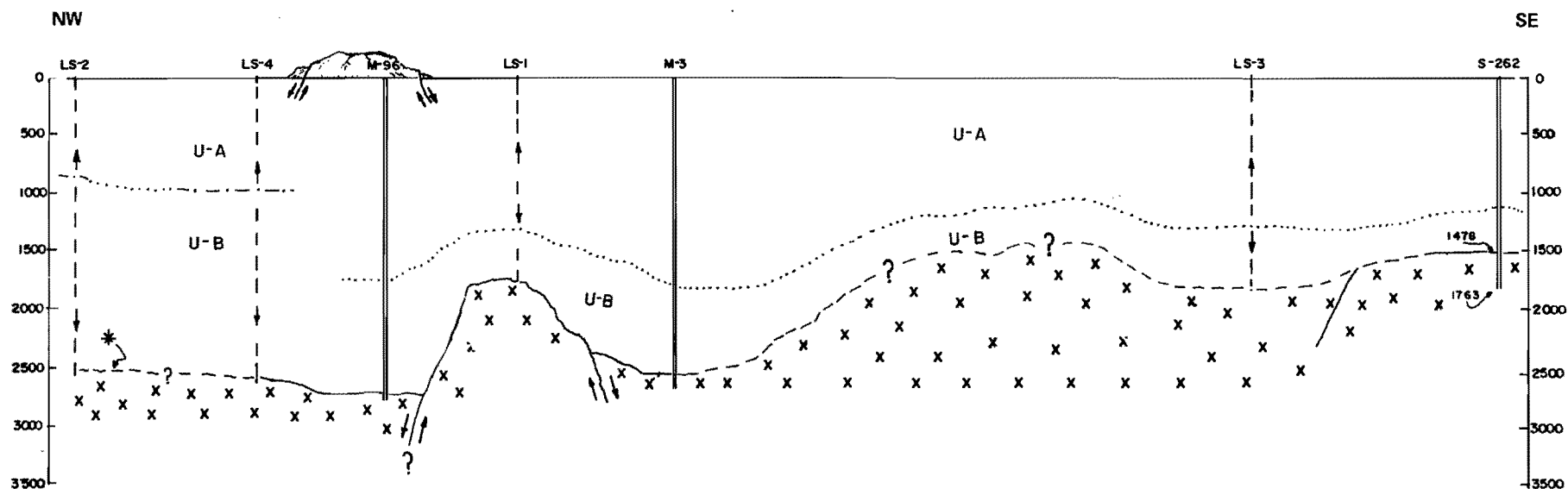
De los resultados obtenidos mediante los estudios geofísicos, así como de las perforaciones, hemos inferido, que los bloques graníticos que forman el basamento en el Valle de Mexicali fueron afectados por movimientos tectónicos ascendentes y descendentes, siendo donde se perforó el pozo S-262 un máximo exponente de los bloques tectónicos ascendentes, sitio en el cual se encontró el basamento a 1478m de profundidad (Figs. 8 y 10).

Los bloques predominantes ascendentes, se alinean a un rumbo general NW-SE (Figs. 8 y 9), paralelos a la Sierra de los Cucapa.



XBL 798-10916

Figura 9. Corte geológico sudoeste-nordeste.



27

LS- PUNTO DE LA LINEA SISMICA DE REFRACCION DONDE SE DETECTO EL BASAMENTO

..... CONTACTO GEOLOGICO ENTRE LAS UNIDADES A y B INDEFINIDO, TANTO POR SISMICA COMO POR PERFORACIONES

--- CONTACTO GEOLOGICO, DEFINIDO POR SISMICA

* CONTACTO PROYECTADO, SEGUN LINEA SISMICA 4

x x x BASAMENTO

// FALLAS SUPERFICIALES EN LOS LADOS SE y NO DEL VOLCAN DE CERRO PRIETO

0 500 1000 m.

XBL 7811-12849A

Figura 10. Configuración del basamento en una sección noroeste-sudeste en base a sísmica de refracción y pozos.

En cambio hacia Salton Sea y el Golfo de California, los bloques tectónicos tienden a descender en forma escalonada y gradual, lo mismo hacia el NE y E del campo geotérmico de Cerro Prieto, -- donde estos últimos y hacia el NE, tienen un significativo descenso, el cual diversos investigadores basados en estudios gravimétricos y magnéticos, -- han supuesto que el basamento esté entre 6000 y -- 6500m de profundidad, esta anomalía negativa se localiza en el Ejido Jalisco a 7 km. al NE 35° del -- pozo Prian 1, el cual llegó hasta 3500m de profundidad, perforando solamente sedimentos deltaicos -- (Fig. 13).

V.- CORRELACIONES GEOLOGICAS ENTRE LAS UNIDADES LITOLOGICAS A, B Y C.

En base a las unidades litológicas antes descritas y determinadas, en base a los recorres de perforación, núcleos y la sísmica de refracción -- (Figs. 6 y 7), se formaron secciones geológicas, -- con el fin de tratar de analizar tanto el comportamiento estructural como el espesor aproximado de -- los sedimentos Cenozoicos.

Para tal fin, se realizaron siete secciones -- de rumbo predominante NW-SE (Figs. 11, 12, 14, y -- 15) y cinco con rumbo general SW-NE (Figs. 13 y -- 15).

En un área central y limitada por los pozos -- 7, 114, 130, 10, 46, 45, 105, 181, 9 y 43 (Figs. -- 11, 12 y 13), se observa que la unidad litológica A, tiene un espesor promedio entre 500 a 750m. Hacia el NE, SE y el E, el espesor varía entre 1350m (M-53) a 2215m (Prian 1). En cambio al NW (M-96, -- M-3), al W (M-6) y al SW (S-262), esta unidad A de sedimentos arcillo-arenosos, no consolidados y semi -- consolidados, presenta entre 70% y 80% de sedimen -- tos arenosos e intercalados entre ellos, delgados -- lentes de lutitas de color café y gris.

De acuerdo a las diferentes profundidades a -- las que se ha atravesado el contacto litológico entre las unidades A y B mediante los pozos que a la fecha se han construido, hemos considerado que esas diferencias de desniveles, se deba a los efectos tectónicos, que en forma ascendente y descendentes, -- han afallado y fracturado tanto a las formaciones -- sedimentarias, como al basamento; fracturamientos -- que en parte se ha comprobado en los núcleos que se han obtenido de la unidad B, en los que se aprecian microfallas, fracturas y estructuras de hundimiento en las lutitas y areniscas.

En las secciones IV-IV', V-V' y VI-VI' de rumbo general SW-NE, se aprecia que la unidad A aumenta de espesor hacia el NE y E y por consiguiente el contacto con la unidad B se presenta más profundo. Las diferencias de niveles del contacto entre U-A y U-B en estas secciones, varía entre 50m, (M-25 a M-5), hasta 630m (M-10 a M-53), lo que consideramos -- se deba al sistema de afallamientos principales denominado "Cerro Prieto" (A. Calderón 1962), de rumbo predominante NW-SE, formando una estructura del tipo echelon, con echados al NE. Entre el M-53 y -- el pozo Prian 1, la diferencia en el desnivel en el contacto U-A U-B, es de aproximadamente 1500m.

En las secciones I-I', II-II', III-III', VII- -- VII', VIII-VIII', IX-IX', XI-XI', XII-XII', de rumbo

NW-SE, se realizaron, con el fin de conocer la posición y comportamiento estructural de los sedimentos tanto hacia el NW como al SE, observándose y -- determinándose que se presenta un sistema de fallas casi normales al sistema principal, al cual -- lo denominamos sistema de fallas secundario "Volcano" (De la Peña y Puente C., 1979).

Este sistema de fallas secundario de acuerdo a lo observado, también tienden a comportarse en forma escalonada y descendente principalmente hacia el S y SE.

Con el fin de comparar el fracturamiento determinado en las secciones geológicas, se realizó una fotointerpretación de la zona geotérmica de Cerro Prieto, con el fin de detectar fracturamientos superficiales (Fig. 17), los cuales comparándolos con el fracturamiento obtenido en las secciones -- que se proyectaron en planta (Fig. 16), notamos -- que existe cierta concordancia del fracturamiento profundo al fracturamiento que se presenta en la -- superficie.

IV.- COMPORTAMIENTO DE LA SALMUERA DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD DE EXPLOTACION DE LOS ACUIFEROS DE AGUA SOBRECALENTADA

En base al espesor de la U-A, como de la profundidad de explotación de los acuíferos de agua -- sobrecalentada, contenidos en la salmuera (U-B), -- se ha dividido tentativamente el campo geotérmico de Cerro Prieto en tres zonas de explotación (Fig. 18).

ZONA DE EXPLOTACION SOMERA:

Queda comprendida desde 500m hasta 1000m de -- profundidad (pozo M-7, M-11, M-9), así como también en los pozos 1A, 2, M-3, M-6, M-96 y S-262, -- en estos últimos, se presentaron incrementos de -- temperatura muy superficial entre 100m y 300m de -- profundidad. Estas manifestaciones de temperatura superficiales detectadas en esos pozos, son debido a que esos sitios se perforaron aproximadamente un 80% de horizontes permeables (areniscas) y en un -- 20% de horizontes delgados de lutitas y lodolitas. En estos puntos el sello superior arcillo-arenoso es muy delgado ó no existe como en la Laguna Volcano y por eso se tienen manifestaciones hidrotermales superficiales.

A excepción de los pozos 7, 9 y 11 que sí -- perforaron el contacto litológico UA-UB, los restantes seis 1A, 2, 3, 6, 96 y 262, no atravesaron dicho contacto, y tres de ellos llegaron al basamento granítico (3, 96 y 262) a 2547m, 2722m y -- 1478m, respectivamente (Fig. 10). Esto puede significar que debido a los movimientos ascendentes y descendentes de los bloques tectónicos, la salmuera (UB) haya sido completamente fracturada y afallada ó bien, que en esas zonas donde se presentan horizontes arenosos, sean antiguas zonas costeras de una cuenca de deposición ó bien depósitos de antiguos sistemas de paleocausas.

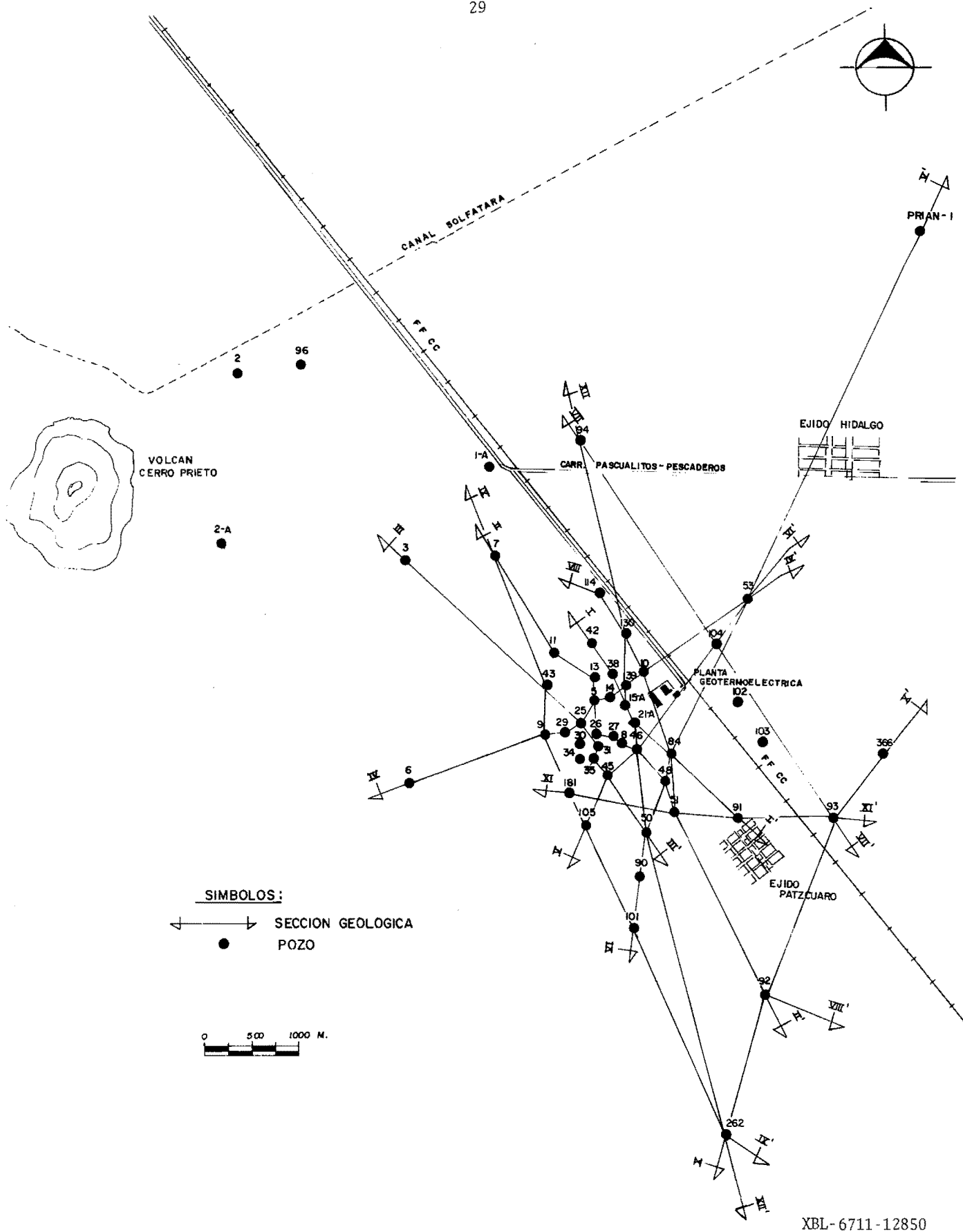


Figura 11. Plano de localización de secciones geológicas.

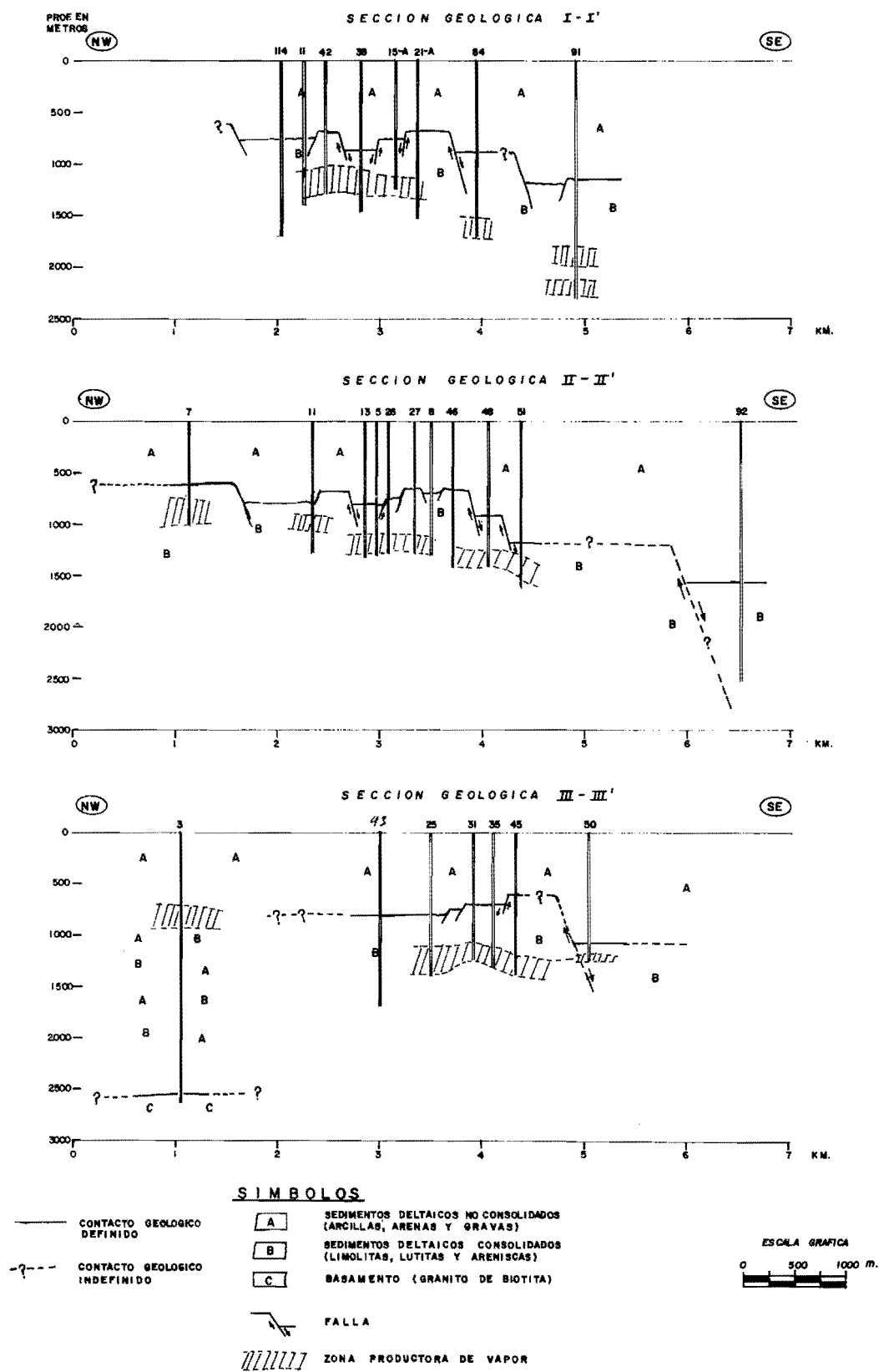
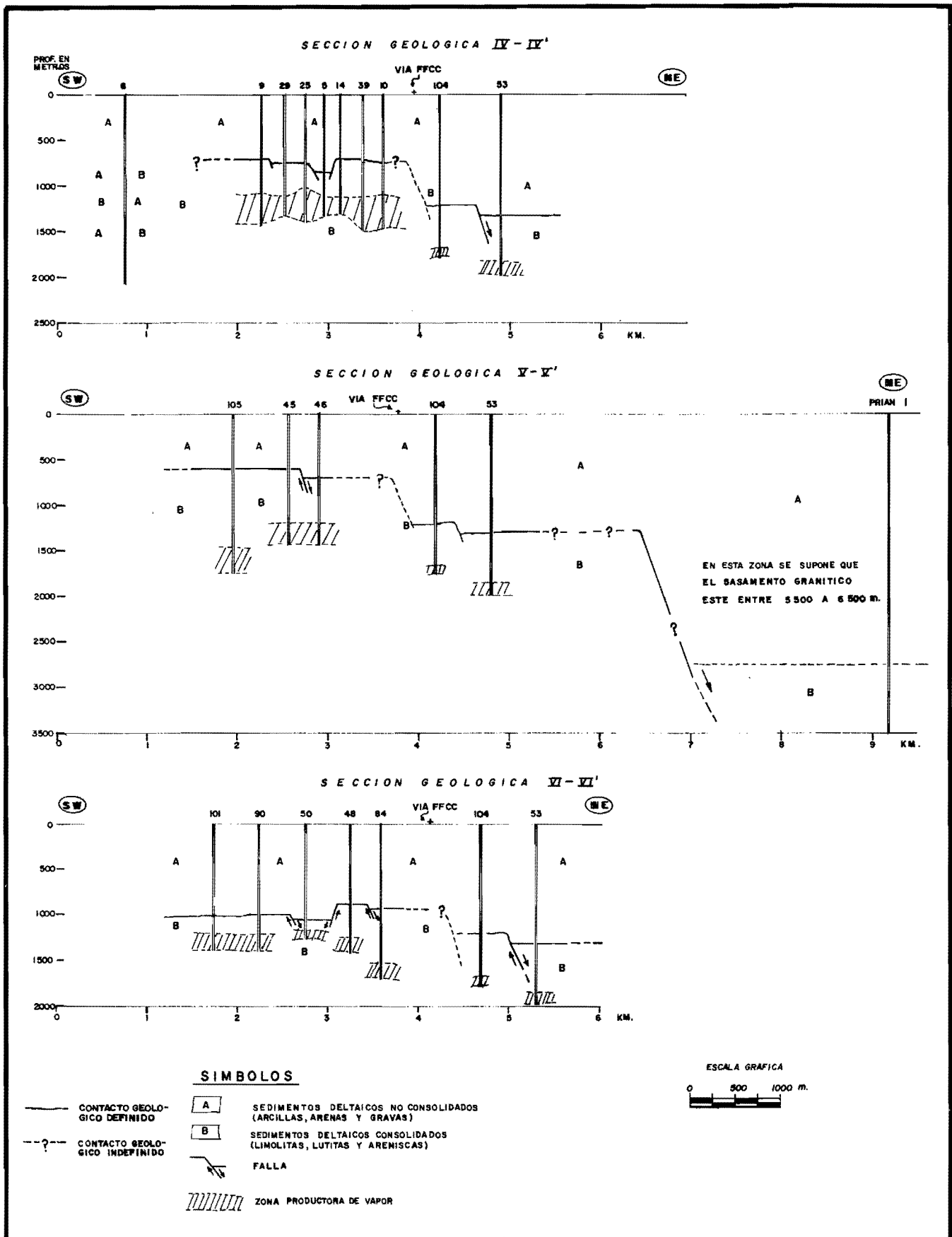


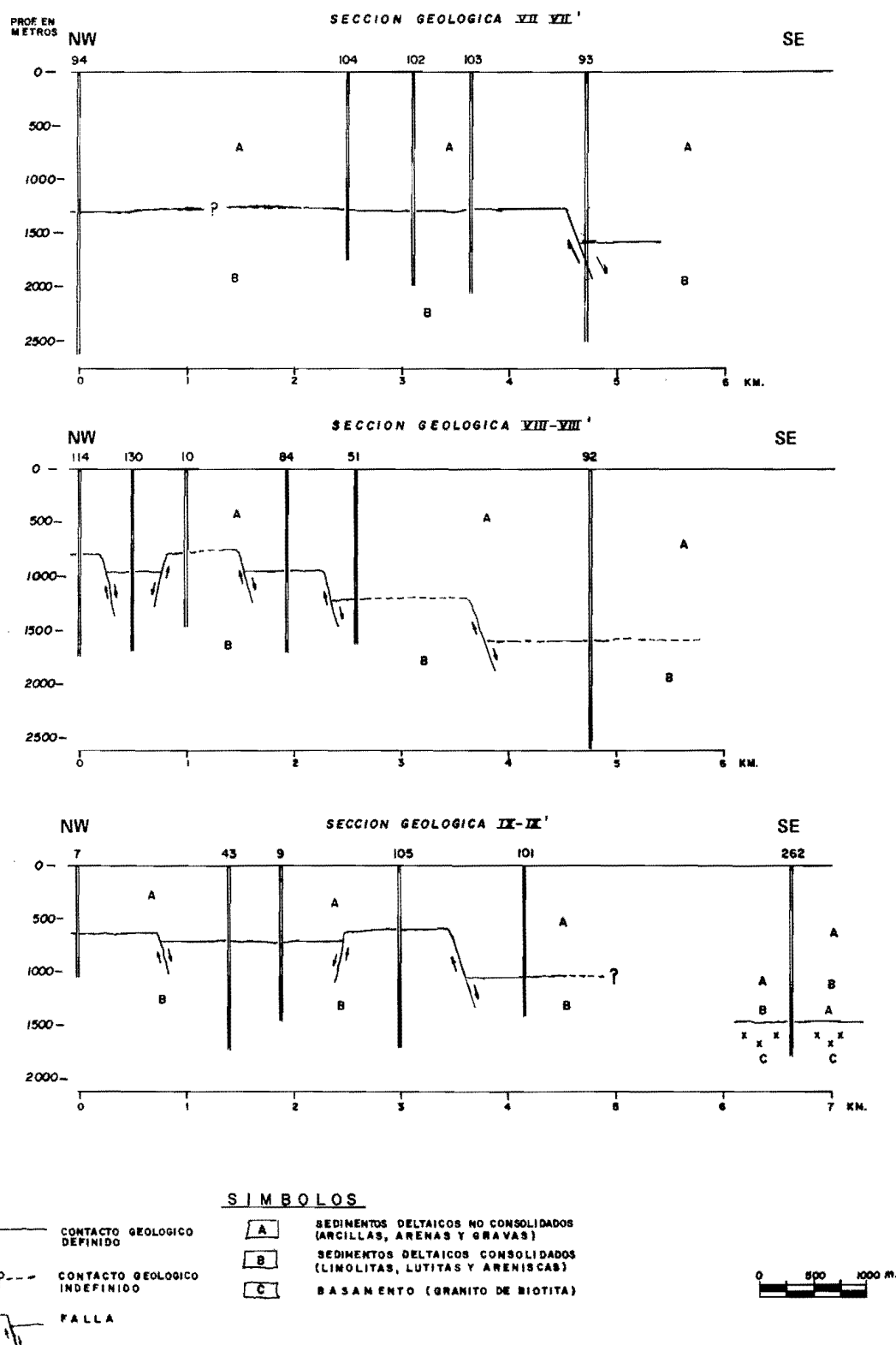
Figura 12. Secciones geológicas I-I', II-II', III-III'.

XBL 7811-12851



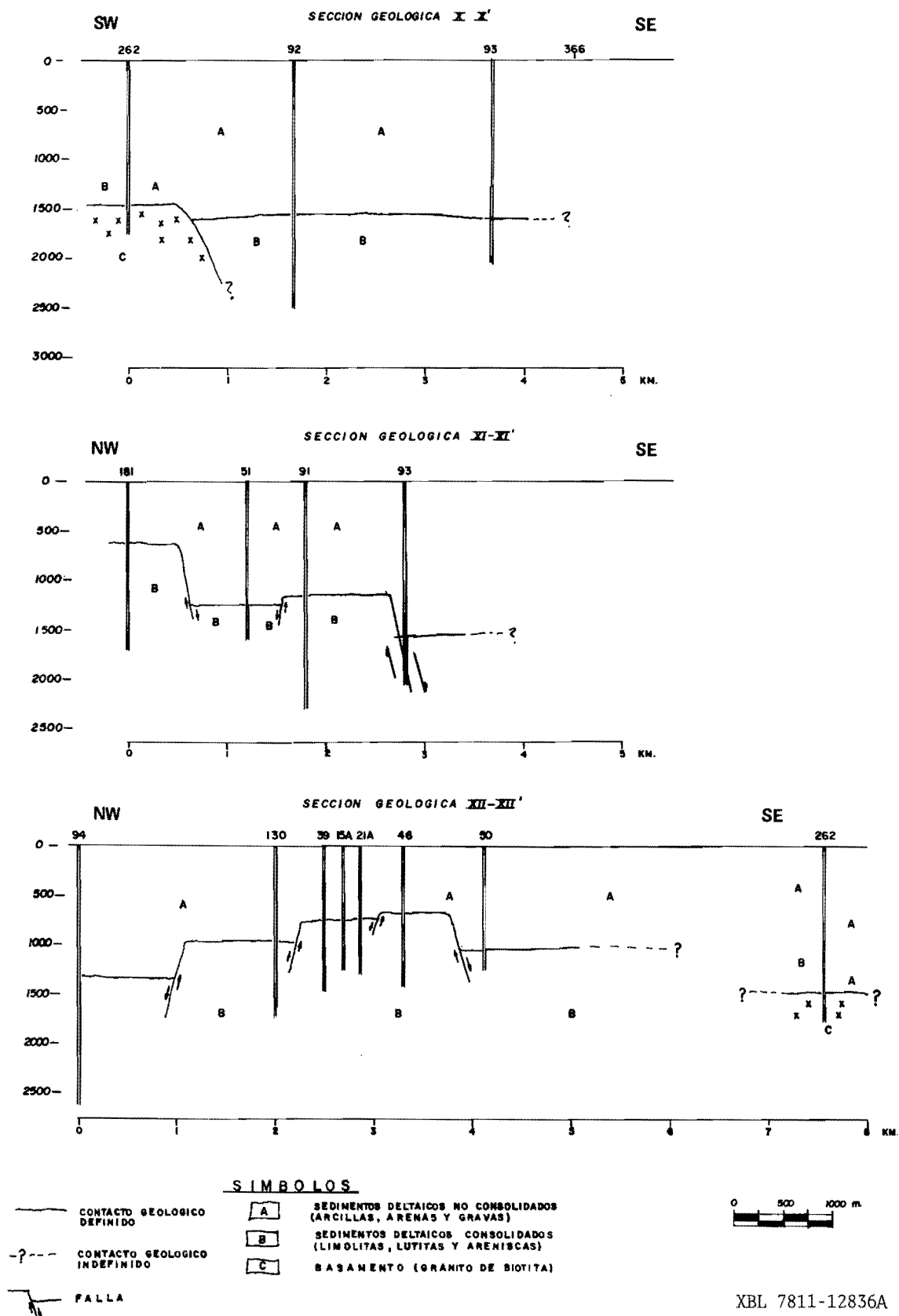
XBL 7811-12834

Figura 13. Secciones geológicas IV-IV', V-V', VI-VI'.



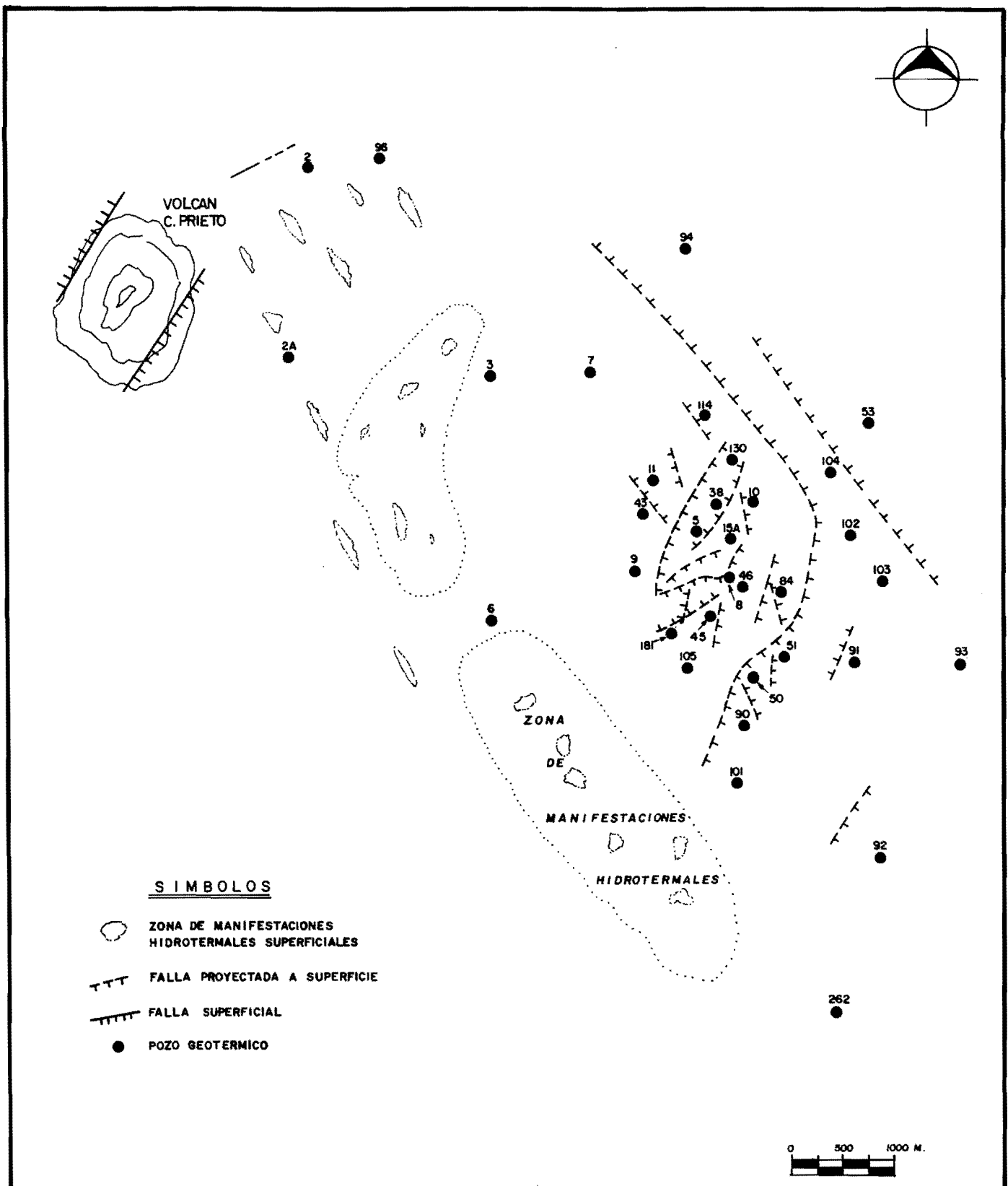
XBL 7811-12835A

Figura 14. Secciones geológicas VII-VII', VIII-VIII', IX-IX'.



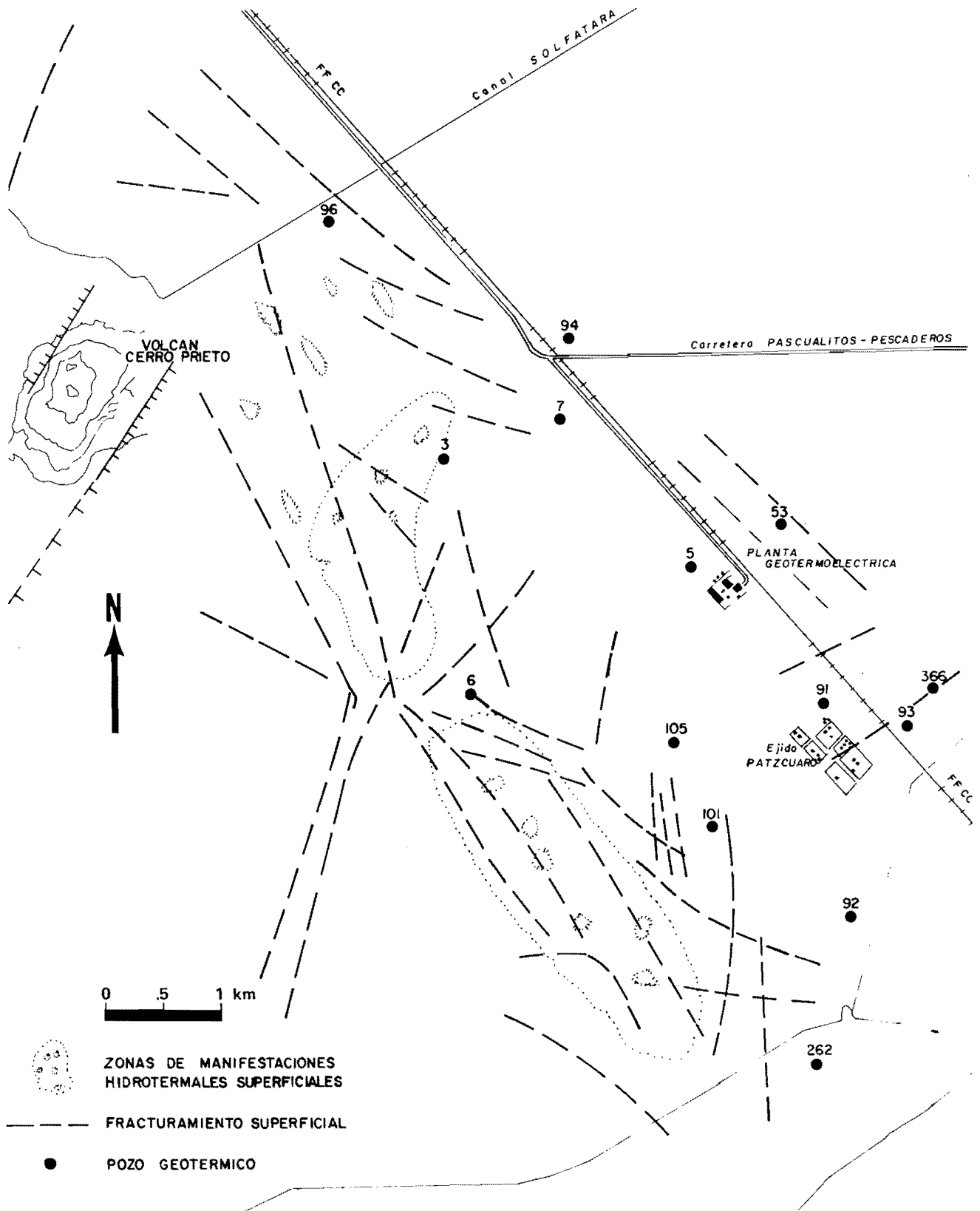
XBL 7811-12836A

Figura 15. Secciones geológicas X-X', XI-XI', XII-XII'.



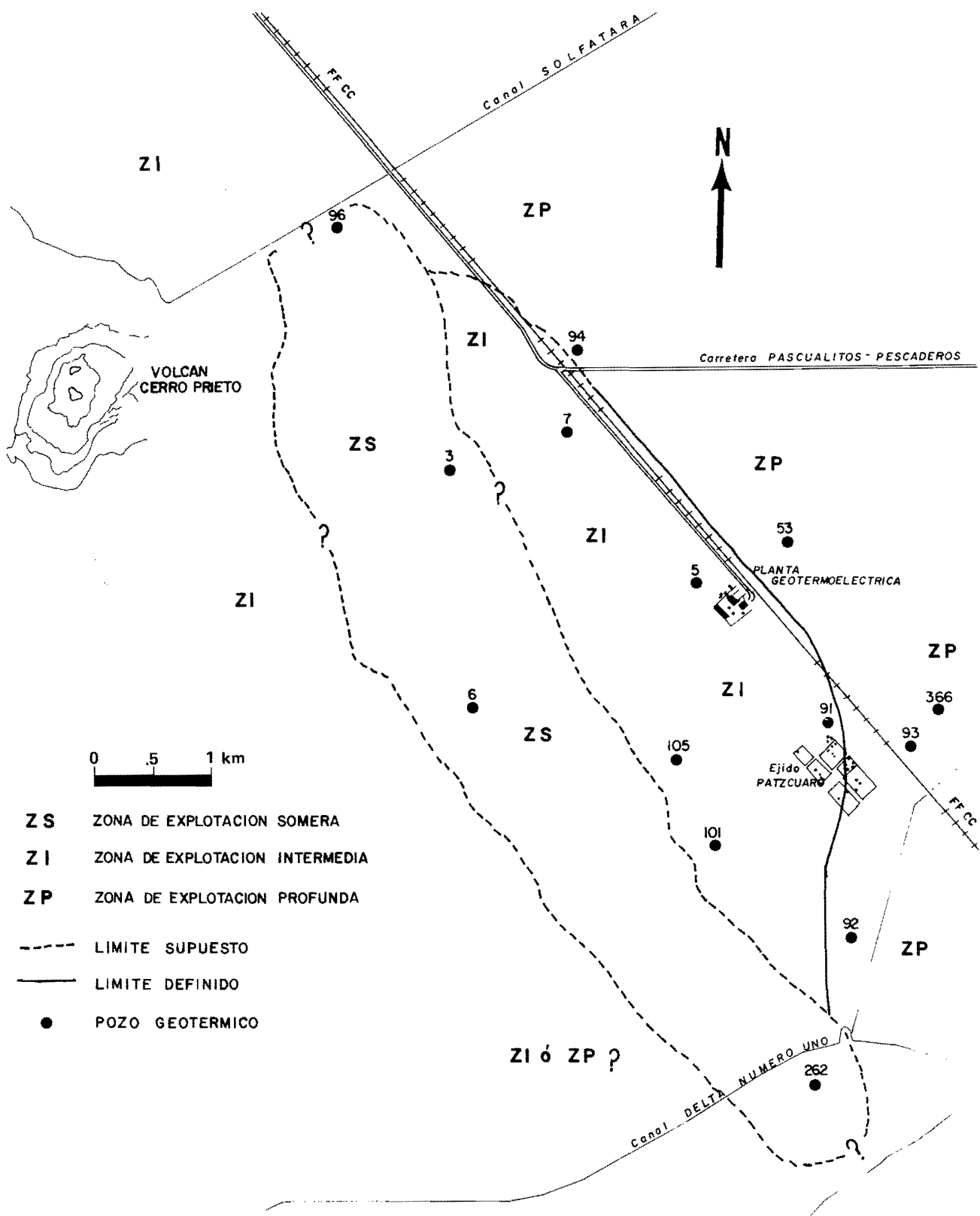
XBL 7811-12837

Figura 16. Fracturamiento en la unidad B.



XBL 798-11026

Figura 17. Fracturamiento superficial en base a fotografías aéreas.



XBL 798-11025

Figura 18. Zonas de explotación.

ZONA DE EXPLOTACION INTERMEDIA

Las mejores zonas productoras quedan comprendidas entre 1200 y 1700m de profundidad, localizándose principalmente donde se construyeron los primeros pozos para C.P. I (Unidades 1 y 2), ya que a la fecha en esa zona (Pozos M-5, 13, 10, 25, 31, 45, 50, 35, 21A, 8, etc.), no se han hecho pozos a más de 1700m de profundidad por el temor de encontrar horizontes ó fracturas a profundidad -- que estén permitiendo el flujo de aguas de menor temperatura, provenientes probablemente del SW (La guna Volcano) ó de NW (M-96) donde se ha comprobado que de 20 a 2700m hay cuerpos sumamente permeables (areniscas), así como en los pozos M-3, M-7, 2 y 1A, donde también se presentan en mayor proporción horizontes de areniscas muy permeables. Esto posiblemente ocurra en las zonas de explotación somera, en donde por la alta permeabilidad de las formaciones sedimentarias permitan el flujo en mayor volumen de aguas menos calientes, las que por volumen y mayor densidad vencen el flujo de agua sobrecalentada que emigran de lo profundo hacia la superficie. En estas zonas de explotación intermedia donde consideramos que a futuro se puede perforar un pozo exploratorio hasta el basamento de + 3500 a 4000m, de profundidad, proponiéndose sea en un sitio cercado al M-5, el cual tiene casi 15 años de explotación y posiblemente próximo a cerrarse. Ese pozo exploratorio, sería para comprobar tanto el espesor de la U-B, como el comportamiento de los acuíferos de agua caliente a mayor profundidad en esta zona de Cerro Prieto.

ZONA DE EXPLOTACION PROFUNDA

En estos puntos, la unidad A, tiene espesores entre 1350 a 1900m, la unidad B aparentemente no está muy fracturada, y si lo está en algunas partes, la U-A por su espesor, no permite fácilmente el paso de los fluidos geotérmicos a la superficie.

Tiene características muy semejantes a las de las zonas intermedias, la diferencia estriba, en que la unidad A es de mayor espesor y las zonas -- productoras son más profundas entre 1700 a 2900m.

La posibilidad de encontrar acuíferos sobrecalentados a profundidades mayores de 3000m en los horizontes de areniscas de la U-B, se reducen debido a que a mayor profundidad, mayor compactación y

consolidación que en ellos se presentaría, y por consiguiente la permeabilidad primaria se vería -- disminuida, pero si tomamos en cuenta la permeabilidad secundaria (fracturamiento), es posible explotar acuíferos de agua caliente profundos, dependiendo principalmente de la permeabilidad secundaria.

AGRADECIMIENTOS

A todos los directivos de la C.F.E. (Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto), como a todo el personal técnico y administrativo, por su apoyo, ayuda y colaboración para hacer posible la presentación de este trabajo.

A los investigadores e ingenieros de: Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), y del Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California Riverside (UCR), por sus atentas colaboraciones y observaciones.

REFERENCIAS

- Alonso E., H., 1965. La zona geotérmica de Cerro Prieto. Informe inédito (Archivo CFE).
- Calderón, A., 1962. Levantamiento sismológico de refracción en la zona geotérmica de Cerro Prieto. Informe inédito (Archivo CFE).
- De la Peña, A., y Puente C., I., 1979. Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto. Actas primera reunión de intercambio técnico sobre geotermia, San Felipe, B.C., México, Nov. 1977 (en prensa).
- Elders, W.A., Rex, R.W., Meidav, T., Robinson, P.T., and Biehler, S., 1972. Crustal spreading in Southern California. *Science*, v. 178, pp. 15-24.
- Lomnitz, C., Mooser, F., Allen, C.R., Brune, J.N., and Thatcher, W., 1970. Sismicidad y tectónica de la región norte del Golfo de California, México. Resultados preliminares. *Geofísica Internacional*, v. 10, No. 2, pp. 37-48.

GEOLOGY OF THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

INTRODUCTION

The Mexican government is actively promoting research in the field of renewable energy resources because it is aware of future electricity needs in different areas of Mexico and conscious of the fact that the nonrenewable energy resources will be exhausted in the future. In this case, we are referring to endogenous steam used as fluid for

generating electricity, so scarce in the northwestern part of Mexico, where hydroelectric plants are nearly impossible to build because of the climate. Fortunately, nature has endowed us with two renewable resources: natural steam extracted from the depths of the earth and the possible construction of solar energy electrical plants in the not-too-distant future.

On behalf of the Mexican government, the Comisión Federal de Electricidad invited other members of the international geothermal community to participate in our geothermal research. In 1977, an agreement was signed with the U.S. Department of Energy to share research experiences in geology, geophysics, geochemistry, subsidence, and reservoir engineering in order to establish the characteristics of the Cerro Prieto geothermal field.

GENERAL GEOLOGY

The present producing field is located in the alluvial plain of the Mexicali Valley and is made up in part of Quaternary piedmont sediments from the Cucapah Range, and in part by deltaic sediments deposited by the meandering currents of the Colorado River. The only prominent topographic feature in the Valley is the Cerro Prieto rhyodacitic volcano, which is less than 700,000 years old. The Quaternary deposits overlay metamorphosed Cenozoic sediments, which in turn are discordant on the granitic and metasedimentary Upper Cretaceous basement (Figures 1 and 2).

TECTONICS

The Cerro Prieto geothermal field is located within the San Andreas tectonic system, which can be divided into different segments: the geothermal area is situated along a segment we have named Cerro Prieto (a possible prolongation of the San Jacinto fault). Some authors have termed these segments transform faults, which connect spreading centers. The evidence of these spreading centers is recent volcanic activity, swarms of earthquakes, oceanic depressions, and geothermal activity (Figures 3 and 4).

Various geophysical methods had to be used to determine the attitude and layering of the consolidated sediments and of the metasedimentary or granitic basement, because the geological structures holding the hot-water aquifers and the basement of the Mexicali Valley are covered by unconsolidated and semiconsolidated deltaic sediments. Geophysical studies have supplied basic information about the structural behavior of the basement. Information about the overlying Cenozoic sediments has been scarce; it is assumed, however, that they have a similar but more complex structural behavior due to their lithologic composition (Figures 5, 6, and 7).

The principal fault system, which we have named Cerro Prieto, has a general northwest-southeast strike, vertical offsets either to the east or west, and is parallel to such prominent faults as Imperial, Cucapah, Laguna Salada, Algodones, San Andreas, Elsinore, Banning, Mission Creek, and San Jacinto (Figure 3).

The faults that we have designated Secondary Volcano System, with a predominant southwest-northeast strike and vertical offsets to the northwest and southeast, are perpendicular to the Cerro Prieto System. The combined systems have

apparently formed a step faulted horst and graben topography.

A geological model of the basement has been conceived, based on the preceding data. This model has been defined as a series of truncated and step-faulted pyramidal prisms, which are elongated and strike northwest-southeast (Figures 8 and 9).

GENERAL DESCRIPTION OF LITHOLOGIC UNITS A, B, and C

Lithologic Unit A

This unit is composed of unconsolidated and semiconsolidated continental sediments of undifferentiated Quaternary age. It shows repeated sequences of clays, silts, sands, and gravels. Fresh water gastropod skeletons, classified as *Amnicola* (Alonso, 1965) have been found (well M-5 from 500 to 800 m depth). At the bottom of this unit, overlying unit B, semiconsolidated coffee-colored shale layers are usually present (Figure 2).

Unit A, being unconsolidated and semiconsolidated, must behave plastically under tectonic stresses. When the stresses create fractures in the sediments, they are rapidly closed by the clays and sands, not allowing the ascent of hot fluids, provided that this unit is thick enough. The thickness of unit A varies between 600 m (well M-105) and 2215 m (well Priar 1).

Lithologic Unit B

This unit is formed by consolidated deltaic (continental) sediments generally presenting lenticular bedding. Of Tertiary age (as yet not differentiated) it is composed of alternating shales, siltstones, and sandstones. The shales and siltstones are partly metamorphosed and present light to dark grey, sometimes black, colors. The sandstones are light greyish, fine grained, usually well sorted varying between graywackes and arkoses, and sometimes quartzites as in well T-366.

Unit B, being totally consolidated, shows evidence of fracturing in the cuttings and cores caused by tectonic events that occurred in the region. This unit includes the hot aquifers among its permeable horizons. It is assumed that the fractured zones act as the main conduits for the migration of hot brines. Estimated thickness of this unit is between 2000 and 2500 m.

Lithologic Unit C

This basement unit corresponds to the Upper Cretaceous granitic and metasedimentary rocks outcropping in the Sierra Cucapa. Unit C, which forms part of the California batholith in the Cerro Prieto geothermal area, has been penetrated only at three points by wells M-3, S-262, and M-96 at 2547, 1478, and 2722 m, respectively (Figure 10).

From the results of geophysical studies as well as from the drilling program, we have inferred that the granitic blocks of the Mexicali Valley basement have suffered tectonic uplifts and falls. A good example of an uplifted block is shown at well S-262 where the basement was reached at a depth of 1478 m (Figures 8 and 10).

The predominant uplifted blocks have a general northwest-southeast strike parallel to the Sierra Cucapa (Figures 8 and 9). On the other hand, towards the Salton Sea and the Gulf of California, the tectonic blocks tend to be down-thrown gradually and step-wise either to the northeast or east of the Cerro Prieto geothermal field. These downthrows are significant to the extent that several researchers have assumed, based on gravimetric and magnetic studies, that the basement is between 6000 and 6500 m deep. The negative anomaly is located at Ejido Jalisco, 7 km N 35° E of well Prián 1, which reached a depth of 3500 m, penetrating through deltaic sediments only (Figure 13).

GEOLOGIC CORRELATIONS BETWEEN LITHOLOGIC UNITS A, B, AND C

Based on the lithologic units described above, on the drill cuttings, cores, and refraction seismic data (Figures 6 and 7), cross sections were developed in order to analyze the structural behavior and determine the approximate thickness of the Cenozoic sediments. Accordingly, seven cross sections of predominant northwest-southeast strike (Figures 11, 12, 14, and 15) and five of southwest-northeast strike were developed (Figures 13 and 15).

In a central area bounded by wells 7, 114, 130, 10, 46, 45, 105, 181, 9, and 43 (Figures 11, 12, and 13), the lithologic unit A is observed to have an average thickness between 500 and 750 m. Toward the northeast, southeast, and east, the thickness varies between 1350 m (M-53) and 2215 m (Prián 1). On the other hand, toward the northwest (M-96, M-3), west (M-6), and southwest (S-262), unit A is characterized by unconsolidated and semiconsolidated clayish-sandy sediments and is composed of between 70 and 80% sandy sediments with thin intercalations of coffee-colored and grey shale lenses.

According to the different depths at which the lithologic contact between A and B has been reached by the wells drilled to date, we have considered that the elevation differences are due to tectonic effects. These have faulted and fractured, upward and downward, the basement as well as the sedimentary formations. The fracturing has been confirmed by the cores obtained from unit B; microfaults, fractures, and subsidence structures have been observed in shales and sandstones.

In sections IV-IV', V-V', and VI-VI' of a general southwest-northeast strike, one can observe that unit A increases in thickness toward the

northeast and east. Therefore, the contact with unit B is found deeper. In these sections the elevation differences of the contact between units A and B vary from 50 m (M-25 to M-5) to 630 m (M-10 to M-53). We believe these differences are due to the main Cerro Prieto fault system (Calderón, 1962) of northwest-southeast strike, which creates an echelon-type structure with downthrows toward the northeast. Between wells M-53 and Prián 1, the elevation difference of the A-B contact is approximately 1500 m.

Sections I-I', II-II', III-III', VII-VII', VIII-VIII', IX-IX', XI-XI', and XII-XII' of northwest-southeast strike were developed to determine the structural position and behavior of the sediments to the northwest as well as to the southeast. In this way, a secondary fault system, which we called Volcano, almost perpendicular to the main system, was determined (de la Peña and Puente C., 1979). According to what was observed this secondary fault system also tends to have a stepwise behavior, with downthrows mainly toward the south and southeast.

A photointerpretation study of the Cerro Prieto geothermal area was made to determine surface fracturing (Figure 17) and to compare with fracturing established by the geologic cross sections. When the deep fractures are projected in plan (Figure 16) a certain agreement with the surface fracture is noted.

BRINE BEHAVIOR ACCORDING TO THE PRODUCTION DEPTHS OF HOT AQUIFERS

Based on the thickness of unit A and the depth of production of the hot-water aquifers (unit B), the Cerro Prieto geothermal field has been tentatively divided into three production areas (Figure 18).

Zone of Shallow Production

This zone lies between 500 and 1000 m depth (as in wells M-7, M-11, M-9). It is also observed in wells 1A, 2, M-3, M-6, M-96, and S-262 where temperature increases are observed at very shallow depths (between 100 and 300 m). The shallow high-temperature manifestations observed in these wells are caused by the presence of 80% permeable horizons (sandstones) and 20% thin shales and mudstone layers. At these well locations, the upper clay-sandy seal is very thin or does not exist at all, as at the Laguna Volcano, thus explaining the surface hydrothermal manifestations.

Wells M-7, M-9, and M-11 were drilled through the contact between units A and B; wells 1A, 2, M-3, M-6 and S-262 were not. Three wells of the latter group reached the granitic basement (M-3, M-96, and S-262) at 2547, 2722, and 1478 m, respectively (Figure 10). This could mean that because of tectonic movements unit B has been completely fractured and faulted, or that the areas presenting sandy horizons are ancient coastal zones of a sedimentary basin or deposits of paleochannel systems.

Zone of Intermediate Production

The best producing zones are between 1200 and 1700 m depth, localized mainly where the first wells for power plant Cerro Prieto I (units 1 and 2) were drilled. To date, no wells have been drilled deeper than 1700 m (wells M-5, M-13, M-10, M-25, M-31, M-45, M-50, M-35, M-21A, M-8, etc.) because of our concern about finding horizons or fractures at depth that will allow the influx of colder water, probably originating from the southwest (near Laguna Volcano) or the northwest (near M-96). In well M-96 between 20 and 2700 m, very permeable layers (sandstones) have been found. In wells M-3, M-7, 2, and 1A, a large percentage of the total thickness also consists of very permeable sandstone horizons. This influx possibly occurs in the zones of shallow exploitation where the high permeability of the sedimentary units allows larger volumes of colder waters to flow. These colder waters, because of their large volume and greater density, displace the hot water migrating upward from depth.

We are considering drilling a 3500- to 4000-m-deep exploration well down to the basement in these zones of intermediate production. The site proposed is near well M-5, which has been producing for almost 15 years and may be closed in the near future. The purposes of this exploratory well are to determine the thickness of unit B in this part of Cerro Prieto and the behavior of deeper hot-water aquifers.

Zone of Deep Production

In the zone of deep production, unit A has a thickness between 1350 and 1900 m; unit B apparently is not very fractured. Even if unit A is fractured, it does not easily allow the flow of geothermal fluids toward the surface because of its thickness.

This zone has very similar characteristics to the intermediate production zone. The differences are that unit A is thicker and the producing zones are deeper between 1700 and 2900 m. The possibility of finding hot-water aquifers in the sandstone layers of unit B at depths greater than 3000 m is reduced because of their higher consolidation and compaction. Although the primary permeability would be reduced, production could depend on the existence of secondary permeability (fractures) which would allow us to exploit these deep hot-water aquifers.

ACKNOWLEDGMENTS

We acknowledge the support, help, and collaboration of all the officials of CFE (Coordinadora

Ejecutiva de Cerro Prieto) as well as of its technical and administrative personnel who made the preparation of this paper possible. We also thank the researchers and engineers of: Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), and the Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Riverside (UCR) for their kind collaboration and observations.

FIGURE CAPTIONS

Figure 1. Geologic map of the Cerro Prieto area.

Figure 2. Generalized stratigraphic column of the Cerro Prieto area.

Figure 3. Regional tectonic map.

Figure 4. A, transform fault and spreading center model proposed by Lomnitz, et al. (1970) and Elders, et al. (1972). B, location of these faults and centers in the Imperial and Mexicali Valley.

Figure 5. Location map of seismic refraction lines.

Figure 6. Seismic refraction cross sections 1, 2, 3, and 4, Cerro Prieto area.

Figure 7. Seismic refraction cross sections 5, 6, 7, 8, and 9, Tule Check area.

Figure 8. Basement configuration.

Figure 9. Southwest-northeast geologic cross section.

Figure 10. Northwest-southeast cross section showing basement configuration based on refraction seismic and well data.

Figure 11. Location map of geologic cross sections.

Figure 12. Geologic cross sections I-I', II-II', and III-III'.

Figure 13. Geologic cross sections IV-IV', V-V', and VI-VI'.

Figure 14. Geologic cross sections VII-VII', VIII-VIII', and IX-IX'.

Figure 15. Geologic cross sections X-X', XI-XI', and XII-XII'.

Figure 16. Faulting of unit B.

Figure 17. Surface faulting based on aerial photographs.

Figure 18. Production areas.