

27
8-23-82
CONF-810399-21

LBL-11967
CONF-810399



① I-4966
**THIRD SYMPOSIUM
ON THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD,
BAJA CALIFORNIA, MEXICO**



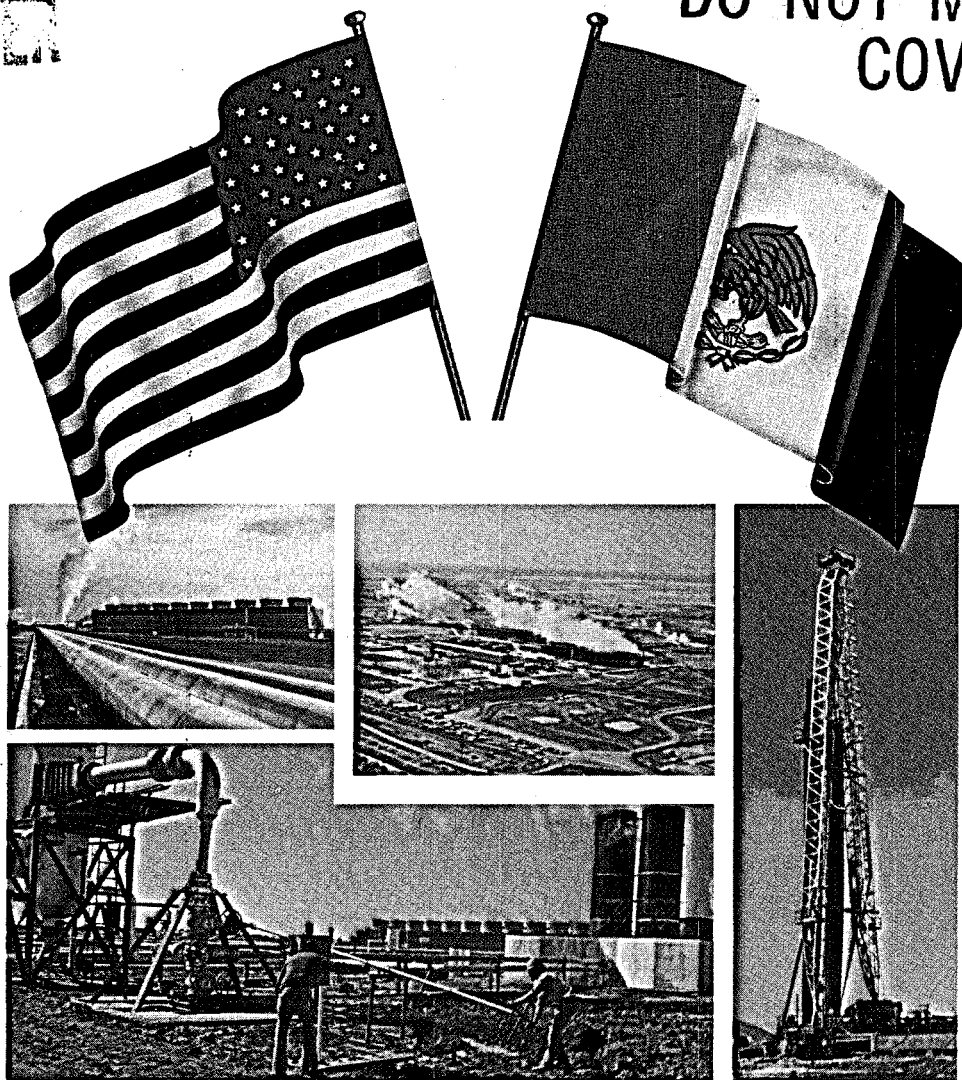
Sponsored by

United States Department of Energy, Office of Renewable Technology
Geothermal and Hydropower Technology Division

in Cooperation with
Comisión Federal de Electricidad de México

MASTER

DO NOT MICROFILM
COVER



PROCEEDINGS/ACTAS

March 24 - 26, 1981
San Francisco, California



Earth Sciences Division
Lawrence Berkeley Laboratory
University of California
Berkeley, California 94720



Coordinadora Ejecutiva
de Cerro Prieto
Mexicali, Baja California,
México

Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC03-76SF00098

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED

GEOHIDROLOGIA DEL ACUIFERO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

J. Sánchez R. y A. de la Peña L.
Comisión Federal de Electricidad
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto
Mexicali, Baja California, México

RESUMEN

El presente trabajo resume la información actualizada del acuífero geotérmico de Cerro Prieto con especial énfasis en la zona original de Explotación, es decir, donde se ubican los pozos que aprovechan el acuífero Alfa, del cual se extrae el vapor para las unidades 1 y 2. Se presentan también unos breves comentarios del acuífero Beta el cual se encuentra subyaciendo al acuífero Alfa en el área de C. P. I., extendiéndose además hacia el Este constituyendo lo que se conoce como Cerro Prieto II y III. En la fig. 1, se indica la ubicación de la zona de estudios.

Los acuíferos Alfa y Beta se diferencian entre otras cosas, por presentar minerales y cementantes característicos y presentar temperaturas y profundidades del nivel piezométrico diferentes, por ejemplo en el área del pozo E-1 se tiene:

	Prof. del nivel Piezométrico	Temperatura
Acuífero Alfa (pozos M-8, M-31 y M-35)	325m	300°C
Acuífero Beta (Pozo E-1)	230m	330°C

Por la diferencia de niveles, se puede asegurar que localmente no hay comunicación hidráulica entre ambos acuíferos, situación que se comprobó con la prueba de interferencia que se realizó teniendo el pozo E-1 como productor en el acuífero Beta y el pozo M-46 de monitoreo en el acuífero Alfa, no habiéndose observado ninguna interferencia entre ellos.

A continuación se presenta la información geológica, geohidrológica y geoquímica de Cerro Prieto.

GEOLOGIA

Geomorfología

El campo de Cerro Prieto se encuentra ubicado en la planicie de inundación del Río Colorado, formando parte de la

provincia fisiográfica de "Sierras de Baja California", la que se une a la zona desértica de Sonora por el Delta del Río Colorado.

Estratigrafía

Cretacio Superior.— Está representado en el área por rocas ígneas intrusivas, que forman parte del gran batolito granítico que se encuentra a lo largo de la Península de Baja California.

Esta unidad ha sido alcanzada durante las perforaciones efectuadas en Cerro Prieto por los pozos M-3 a 2,579m., M-96 a 2,718m. y S-262 a 1,473m., de profundidad.

Su clasificación al microscopio corresponde a un granito de biotita. Dicha unidad constituye el basamento del Valle de Mexicali.

Terciario

Esta unidad que sobreyace al basamento granítico, está constituida por lutitas, lutitas limolíticas, limolitas de color gris a negro y areniscas. Las lutitas y lutitas limolíticas presentan coloración de gris a negro, correspondiendo estas últimas a las zonas de mayor metamorfismo. Esta unidad de sedimentos consolidados finos, se encuentra interdigitada con areniscas de cuarzo y escaso feldespato, de grano fino a grueso de color blanco a blanco grisáceo, cementados con carbonato de calcio y/o sílice.

Las lodolitas constituyen la cobertura de los sedimentos anteriores y constituyen la zona de transición entre los sedimentos consolidados y los no consolidados. Normalmente presentan una coloración café.

Pleistoceno y Reciente

Están representados por los sedimentos que constituyen la planicie aluvial del Valle de Mexicali, la que está constituida por una mezcla heterogénea en cuanto a composición, origen y medio de depósito, los cuales son principalmente, atendiendo a su tamaño; gravas, arenas, limos y arcillas.

DISCLAIMER

This report was prepared as an account of work sponsored by an agency of the United States Government. Neither the United States Government nor any agency Thereof, nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or any agency thereof. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or any agency thereof.

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

Unidades Hidroestratigráficas

Se han identificado tres acuíferos principales comprendidos en dos unidades hidroestratigráficas:

1.- Unidad Aluvial.- Presenta morfología de llanuras y está constituida por depósitos lacustres y de ríos antiguos formados por arcillas, limos, arenas y escasas gravas. Su espesor varía de 700m., en la zona de explotación de Cerro Prieto I, Unidades 1 y 2 a 2,000m., en el pozo NL-1 ubicado al Este de Cerro Prieto I.

El conjunto aluvial tiene una estructura heterogénea, presentando tanto zonas impermeables como permeables, predominando estas últimas en las partes arenosas de los antiguos cauces del Río Colorado, que están labrados sobre sedimentos arcillosos. El aluvión se comporta como unidad de permeabilidad media y alta.

2.- Unidad de Lutitas y Areniscas.- Se encuentra subyacente a la unidad aluvial y a la zona de transición. En la fig. 2, se observa que Cerro Prieto I, se encuentra entre las fallas Cerro Prieto, Michoacán y Pátzcuaro, mismas que originaron el levantamiento del basamento, sobre del cual descansa. En las secciones de las figs. 3 y 4, se observa gráficamente la estructura que estas fallas originaron. En ellas también se observa que el tamaño del acuífero Alfa es bastante reducido debido al sistema de fallas que lo afectó, pues aparentemente antes de que fuera afectado por el tectonismo, se extendía hacia el Noreste, (Cerro Prieto II). De cualquier manera, en la actualidad, presenta en cuanto a dimensiones sólo una fracción del Beta y parece ser sólo un remanente de éste.

HIDROLOGIA SUBTERRANEA

Acuífero Alfa

El acuífero Alfa es explotado actualmente por un promedio de 20 pozos con profundidades de 1,300 a 1,700m., sus areniscas productoras se caracterizan litológicamente por estar cementadas con carbonato de calcio. Dichas areniscas se encuentran intercaladas con pequeños cuerpos lenticulares de lutitas y limolitas mismos que por no ser continuos presentan permeabilidad vertical por la presencia de cuerpos de areniscas entre éstos. Únicamente cuando los espesores de lutitas y limolitas forman estratos continuos y potentes, tal como se encuentran en la cima y base de este acuífero, se puede decir que existe una efectiva capa sello que evita la migración de fluidos en sentido vertical.

Por su posición estructural la capacidad geotérmica del acuífero Alfa es

limitada, ya que se encuentra en la cima de un horst granítico, debido a lo cual no existe continuidad estratigráfica, situación por lo cual presenta las siguientes condiciones en su periferia.

Al Noroeste y Suroeste; los sedimentos conforme se retiran de la zona de explotación se caracterizan (pozos M-6, M-3, M-7, Q-757 y M-94), por volverse eminentemente arenosos, siendo escasos o nulos los sedimentos finos constituidos por lutitas y limolitas, es decir, la capa sello tiende a desaparecer. Esta porción funciona como un buen acuífero, mismo que suministra parte del agua que se extrae en Cerro Prieto, aunque las temperaturas en éste son un poco inferiores a las de la zona de explotación.

Al Noreste, por efecto de la falla Michoacán, cuya ubicación en planta se indicó en la figura 2, el acuífero Alfa se encuentra en contacto con el acuífero aluvial del Valle de Mexicali (fig. 3), mismo que proporciona gran parte del flujo hidráulico que se aprovecha en Cerro Prieto, con el inconveniente, desde el punto de vista geotérmico, que las aguas contenidas en él son frías.

Al Sureste, (Área de los pozos M-34, M-8 y M-21), antes que se construyeran los pozos que suministran vapor a las unidades 3 y 4 (1978-1979), parte de la recarga hidráulica provenía de esta parte. Al entrar en operación los pozos de las unidades 3 y 4, gran parte de la recarga hidráulica fue aprovechada por estos pozos, lo que motivó que los pozos de las unidades 1 y 2, declinaran su producción, pues esa recarga estaba constituida por agua a muy elevada temperatura.

Curvas de igual profundidad de los niveles piezométricos

La máxima profundidad del nivel piezométrico en el acuífero Alfa, para los años 1976 y 1978, (fig. 6), inferido a partir de los registros de presión, es del orden de 450m., mismo que se encuentra en el centro del campo en el área de los pozos M-5, M-25 y M-14. Los niveles más someros, con profundidades de 150 a 200m., se encuentran en los pozos M-9, M-114 y M-130. Se pueden considerar estas profundidades en la actualidad como vigentes, ya que las observaciones piezométricas, nos indican que de esos años a la fecha las variaciones han sido mínimas.

Flujo hidráulico subterráneo

Del mismo plano con las curvas de igual profundidad del nivel piezométrico, correspondiente a 1976 a 1978, (fig. 6), se puede observar que la dirección del flujo hidráulico, es en el área de explotación antigua (pozos U-1 y U-2), es de la periferia hacia el centro del

campo. Obviamente, esta dirección es producto de la explotación del agua geotérmica.

Por lo que respecta a la parte sureste del campo, donde se ubican los pozos que suministran vapor a las Unidades 3 y 4, los niveles piezométricos indican que en esos años existía un máximo piezométrico en el área de los pozos M-50, M-51 y M-91, el cual se drenaba en dos direcciones principales: hacia el Noreste, es decir, hacia la zona de explotación antigua y hacia el Sureste. En virtud de que en alguno de los pozos en que se detectó dicho máximo, están terminados tanto en el acuífero Alfa como en el Beta, no se ha definido si este máximo piezométrico afecta sólo un acuífero o ambos. Es posible que en la actualidad, la mayoría del flujo hidráulico mencionado anteriormente, tenga una dirección preferencial hacia el Noreste, es decir, hacia el área con mayor número de pozos y por ende de mayor extracción de agua geotérmica, ya que las curvas de isopropundidad representan las direcciones que tenía el acuífero geotérmico hace 4 años, los cuales no se han podido actualizar, debido a que la mayoría de los pozos están en operación y no es posible tomarles registros de presión a flujo restringido.

Magnitud del abatimiento

En el plano de curvas de igual profundidad del nivel piezométrico para 1970, (fig. 7), se observa que las profundidades máximas en el centro del campo eran de 200m. En el plano de isopropundidades para 1976-1978, se observa que la máxima profundidad era del orden de 450m., lo que significó un abatimiento máximo de 300m., que representó una caída de presión de 30 Kg/cm², a una profundidad aproximada de 1,300m., es decir, la profundidad media del acuífero Alfa. El abatimiento medio en toda la zona de pozos de las unidades 1 y 2, fue de 144.6m., es decir, 14.46 Kg/cm².

En las figuras 8 y 9, se indican en sección NW-SE del pozo M-11 al M-51 y SW-NE del pozo M-6 al M-10 las variaciones de los niveles piezométricos para el período de 1973-1977.

Propiedades hidrodinámicas del acuífero

En base a los abatimientos observados en la zona de explotación y en el pozo M-6, y aplicando las ecuaciones de Theis y Jacob, se estimó un coeficiente de transmisibilidad de 0.0034 m²/s y un coeficiente de almacenamiento de 0.005, valores que, aplicados a las ecuaciones geohidrológicas, nos proporcionan abatimientos similares a los observados en el acuífero. Así mismo, de la aplicación de las mencionadas ecuaciones y de la

variación de las presiones y niveles piezométricos en los pozos de observación, se infiere las que el acuífero alcanzó su equilibrio hidrodinámico. Es decir, las variaciones del nivel piezométrico han sido mínimas en los últimos años, e inclusive se han registrado recuperaciones como se puede observar en las figuras 10 y 11, que corresponden a las curvas de abatimiento de los pozos M-6 y M-34, este último ubicado en la zona de explotación.

Como nota adicional, se estimó utilizando la ecuación de Darcy, que la velocidad efectiva del agua en la periferia del campo, entre los pozos M-9 y M-29, es del orden de 2m/día, velocidad que se espera sea verificada en el próximo mes de Agosto, a través de la inyección y detección de radioisótopos en los pozos seleccionados para el efecto.

Conclusiones

Por lo antes expuesto, se puede decir con respecto a la geohidrología, que no hay problema en cuanto al suficiente suministro de agua, debido a la alta permeabilidad del acuífero para fines geotérmicos, pero es esta condición junto con la distribución de temperaturas, las limitantes para el aprovechamiento de la energía geotérmica, pues una extracción mayor implica una velocidad mayor del flujo de agua de la periferia hacia el centro del campo y por consiguiente una disminución del tiempo de contacto agua-roca, lo que se traduce en una menor oportunidad del agua para adquirir la energía calorífica almacenada en la roca. Esta situación se vuelve crítica sobre todo en la parte Este del campo, donde por efecto de las condiciones estructurales del campo, la recarga hidráulica proviene del acuífero aluvial que lo limita, con el inconveniente que las aguas contenidas en él son de menor temperatura.

GEOQUIMICA DE LOS CLORUROS

Con objeto de complementar y comprobar las deducciones inferidas a partir de la información geohidrológica se recurrió al estudio de la concentración y la variación en el tiempo de los cloruros en el fluido geotérmico, ya que éstos han demostrado ser una herramienta muy útil para inferir la dirección y origen de la recarga hidráulica subterránea.

Lo anterior, se debe a que la concentración de cloruros en el agua, es afectada muy poco por la interacción con las rocas a alta temperatura, pero en cambio, sí puede ser afectada de manera apreciable por procesos tales como la ebullición o la mezcla con aguas de diferentes concentraciones de cloruros.

Para el presente informe se trabajó con las concentraciones de cloruros en el acuífero, calculadas a partir de las concentraciones a presión atmosférica, para lo cual se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$Cac = Car (1 - f)$$

$$f = \frac{h_a - h_{100}}{\lambda} \quad \text{Donde}$$

Cac=Concentración en el acuífero

Car=Concentración a la presión atmosférica

f =Fracción de agua evaporada

h_a =Entalpía del agua en el acuífero

h₁₀₀=Entalpía del agua a 100°C y presión atmosférica

λ =Calor latente de vaporización 100°C

Con los valores de la concentración de cloruros en el acuífero, se elaboraron las curvas de isocloruros para 1975, 1977 y 1980, las cuales se describen a continuación:

Curvas de isocloruros de 1975

En ellas (fig. 12), se observa que las concentraciones máximas se localizan en el centro del campo, en los pozos M-26, M-25, M-19 y M-30 con 10,315, 9,779, 9,636 y 9,597ppm., respectivamente. Las concentraciones menores se presentan en la parte Este en el pozo M-15, con 7,592ppm., y al Oeste en el pozo M-9, con 7,720ppm.

La parte Este, presenta concentraciones menores debido al aporte hidráulico, con aguas de mejor calidad, provenientes del acuífero aluvial del Valle de Mexicali, que lo limita lateralmente.

El pozo M-21, presentaba una concentración de cloruros elevada que pudiera deberse a la influencia local de una pequeña fractura o falla, la cual aportaba fluidos geotérmicos con diferente composición química. Esta deducción es debida a que dicho pozo, siempre mostró características muy peculiares que lo han apartado del comportamiento general observado en la mayoría de los pozos.

Curvas isocloruros de 1977

En ellas (fig. 13), se aprecia que las concentraciones máximas corresponden al centro del campo, en los pozos M-19 y M-25 con 9,484 y 9,560ppm., respectivamente. Las concentraciones más bajas se tuvieron en el pozo M-15A con 6,700ppm., y en el M-19 con 6,708ppm., es decir en la parte Este del campo, así como en el pozo M-9 con 7,356ppm., localizado en la parte Oeste del campo.

De lo anterior se desprende que en el centro del campo, la disminución con respecto a 1975, fue de 200 a 250ppm., es

decir fue mínima, mientras que en la parte Este, alcanzó diferencias hasta de 900ppm. (pozo M-15A). Este abatimiento en los cloruros, sugiere que el acuífero Alfa está siendo alimentado por aguas del acuífero aluvial del Valle de Mexicali, el cual está constituido en esta parte por aguas de menor temperatura y mejor calidad química, en este caso, con menor contenido de cloruros por lo que, al circular hacia la zona de explotación de Cerro Prieto I, va diluyendo las aguas del acuífero geotérmico caracterizada originalmente por su elevado contenido de cloruros.

Por lo que respecta al flanco Oeste, los cloruros variaron en menor proporción, debido a que en esta parte las aguas de los acuíferos aluviales que limitan al campo, tienen concentración de cloruros un poco menor a las del acuífero geotérmico, de acuerdo a los análisis realizados en el pozo M-6 y en los barrenos de uso múltiple BCP-5, 13, 19 y 11.

Curvas de isocloruros de 1980

En ellas (fig. 14), se observa que las concentraciones más altas se localizan en el centro del campo con valores de 8,857 a 9,325ppm., siendo las diferencias con respecto a 1977 hasta de 500ppm., en el pozo M-30. En el flanco Este las variaciones fueron del orden de 1,100ppm., en el pozo M-14 y de 2,245ppm., en el pozo M-21.

Este abatimiento en la concentración de cloruros sobre todo en la parte Este, indica que el campo de Cerro Prieto I, actualmente en explotación está siendo afectado por la entrada de agua de menor temperatura y bajo contenido de cloruros. Las curvas y las variaciones de cloruros en el acuífero, nos indican claramente de donde proviene la recarga hidráulica constituida por aguas de diferente calidad y confirman las direcciones del flujo hidráulico subterráneo, inferidas a partir de la geohidrología, por lo que se puede considerar a la geoquímica como una herramienta muy importante de la geohidrología.

ACUIFERO BETA

El acuífero Beta se encuentra en la parte Oeste de la falla Michoacán, subyaciendo al acuífero Alfa y al Este de dicha falla comprende las nuevas áreas en desarrollo denominadas Cerro Prieto II y III, cubriendo hasta donde se conoce actualmente una superficie aproximada de 20 Km².

Las profundidades de los pozos terminados en este acuífero varían de 2000 a 3000m., situación favorable para la explotación geotérmica, ya que involucran un espesor de captación hidráulica y

térmica de por lo menos 1000m. Así mismo, los espesores de las areniscas productoras son por lo menos tres veces mayores a las del acuífero Alfa.

Curvas de igual profundidad de los niveles piezométricos.

Con los niveles piezométricos de los pozos terminados en el acuífero Beta, mismos que fueron inferidos de los registros de presión de fondo realizados en ellos, se formó el plano con las curvas

de igual profundidad del nivel piezométrico (fig. 15), en el cual se observa un máximo piezométrico en el área de los pozos M-102, M-107 y M-109, mismo que se drena en dos direcciones principales: hacia el Noroeste y hacia el Sureste. Este máximo piezométrico también se observa en C. P. I., en el área de los pozos M-50, M-51 y M-48 y parece ser originado por una zona de mayor permeabilidad debida a fracturamiento, ya que esa zona presenta las temperaturas más elevadas, con un alineamiento similar al del máximo piezométrico.

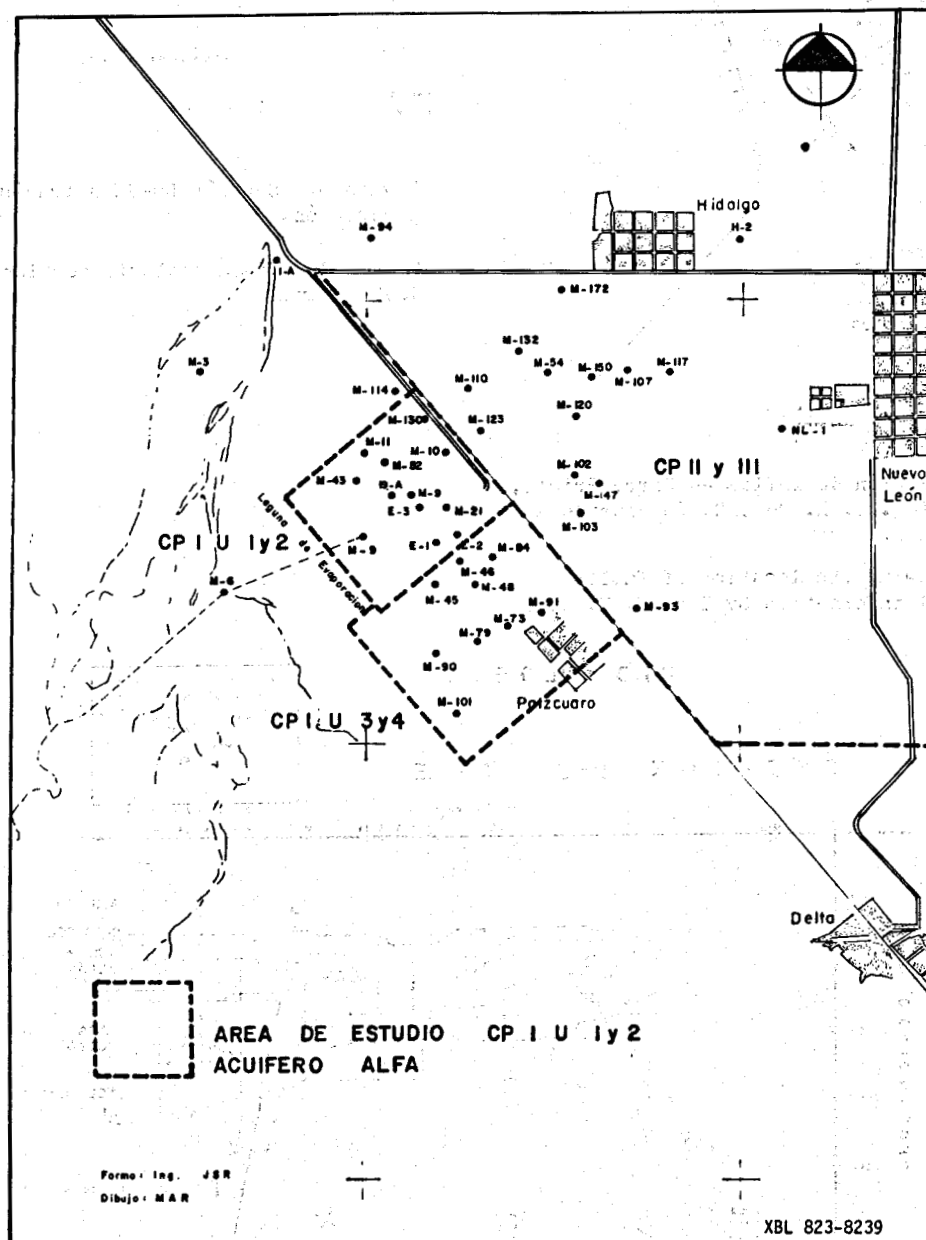


Figura 1. Area de estudio: Acuífero Alfa, Cerro Prieto I, Unidades 1 y 2.

Figure 1. Study area: Alfa aquifer, Cerro Prieto I, Units 1 and 2.

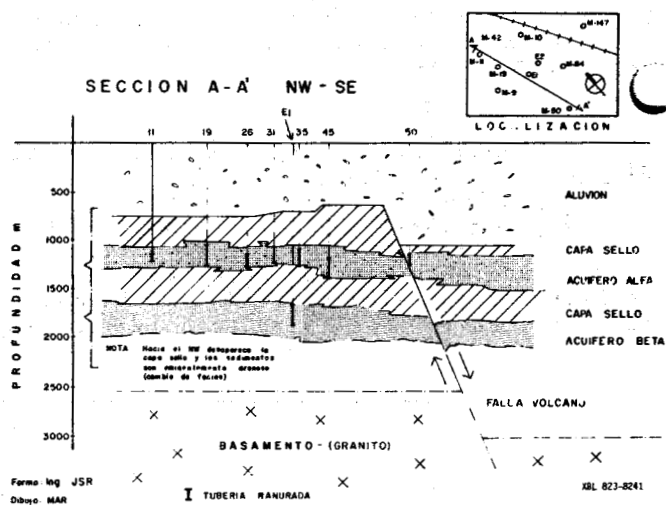


Figure 3. NW-SE geologic section across the production area.

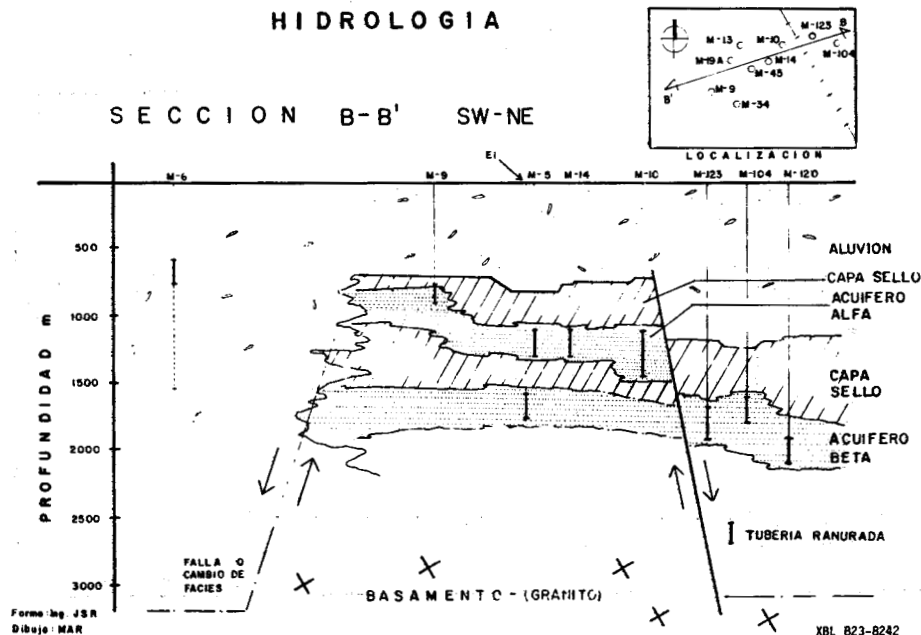
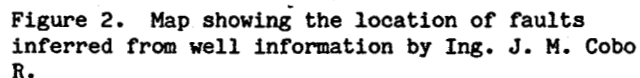


Figure 4. SW-NE geologic section across the production area.

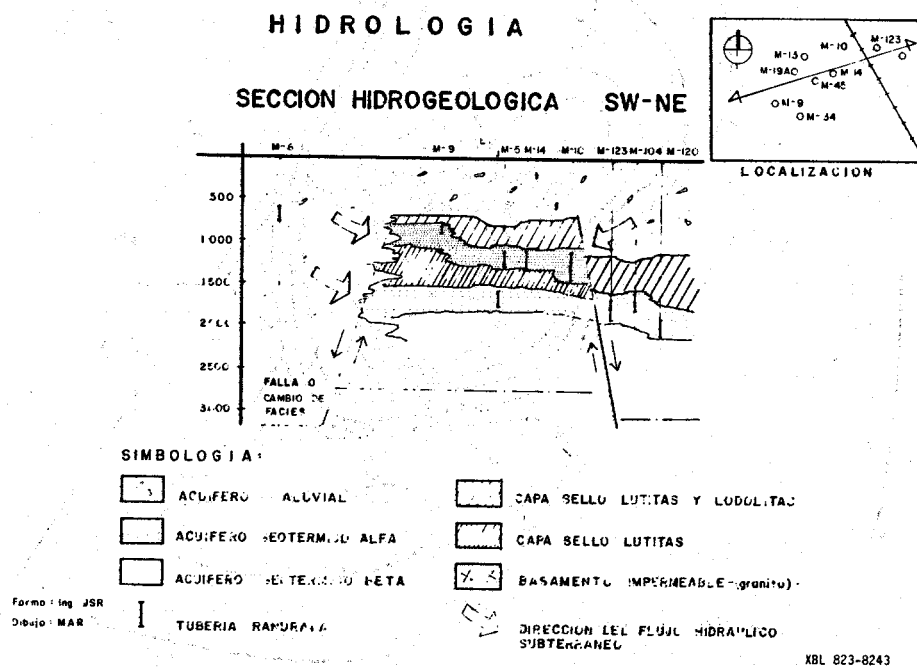


Figura 5. Sección SO-NE a través de la zona de producción.

Figure 5. SW-NE hydrogeologic section across the production area.

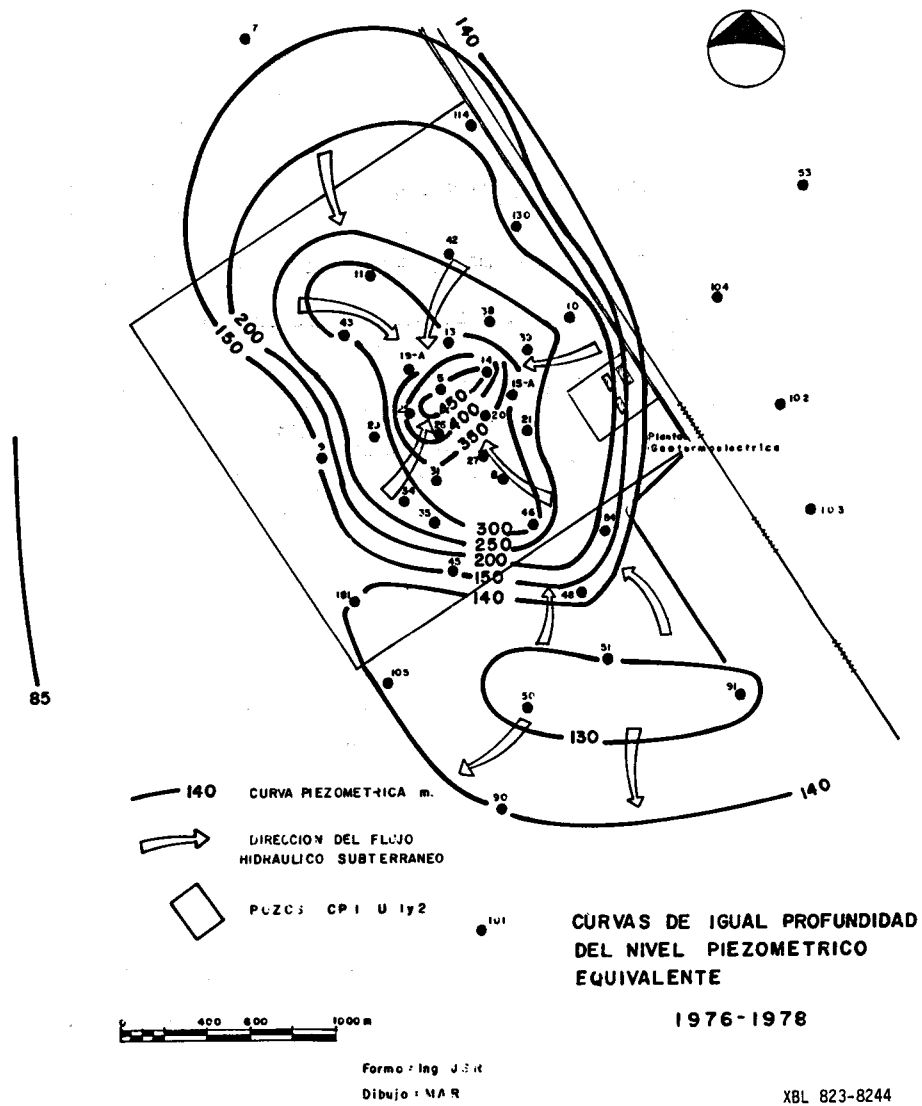


Figura 6. Contornos de igual profundidad del nivel piezométrico equivalente. 1976-1978 (en m).

Figure 6. Piezometric map (equivalent depth in meters) for 1976-1978.

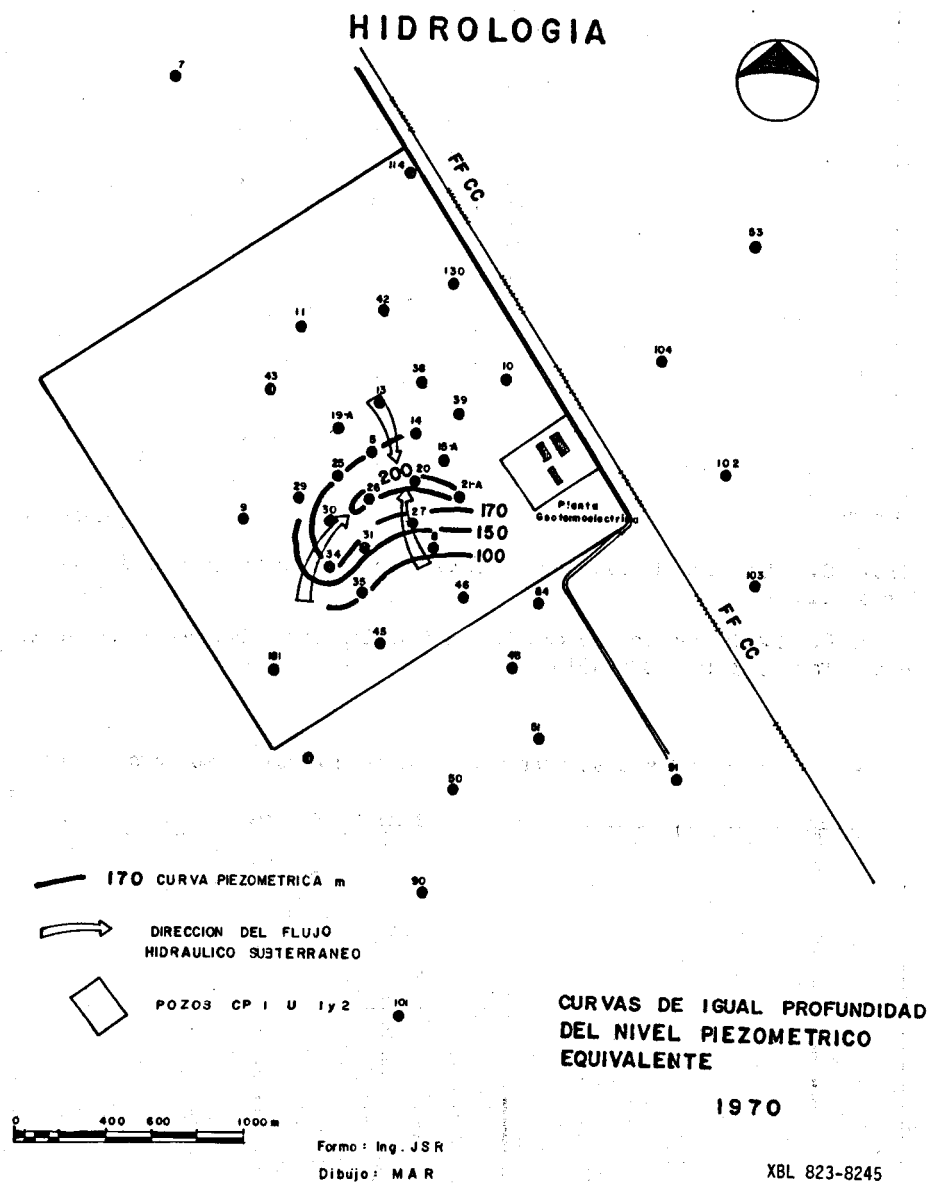


Figura 7. Contornos de igual profundidad del nivel piezométrico equivalente. 1970 (en m).

Figure 7. Piezometric map (equivalent depth in meters) for 1970.

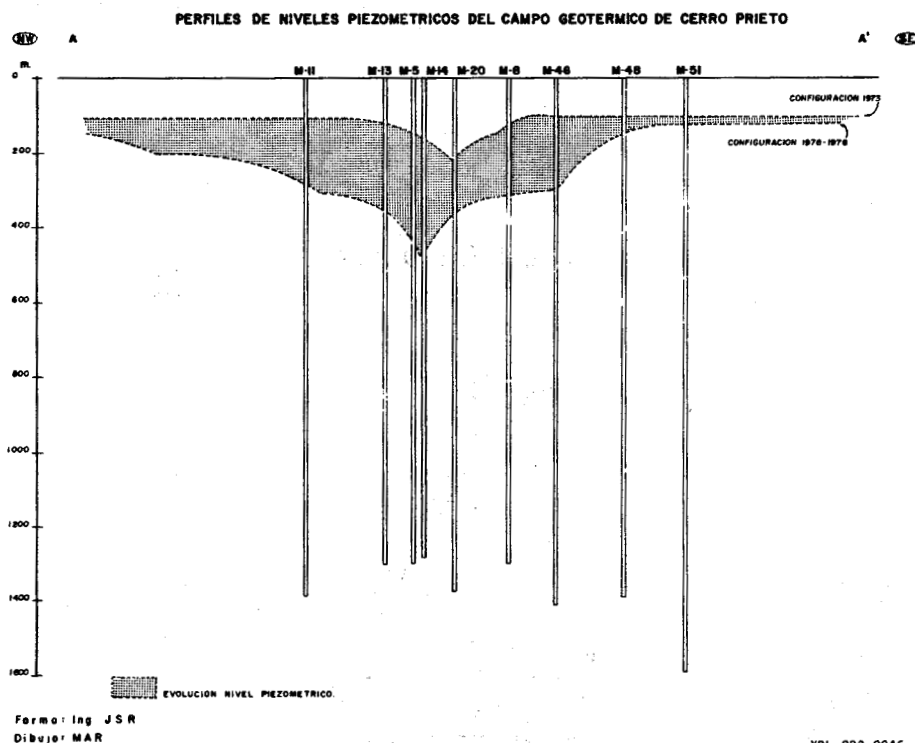


Figura 8. Perfiles de niveles piezométricos del campo geotérmico de Cerro Prieto.

Figure 8. NW-SE section across the production area showing piezometric levels for 1973 and 1976-1978.

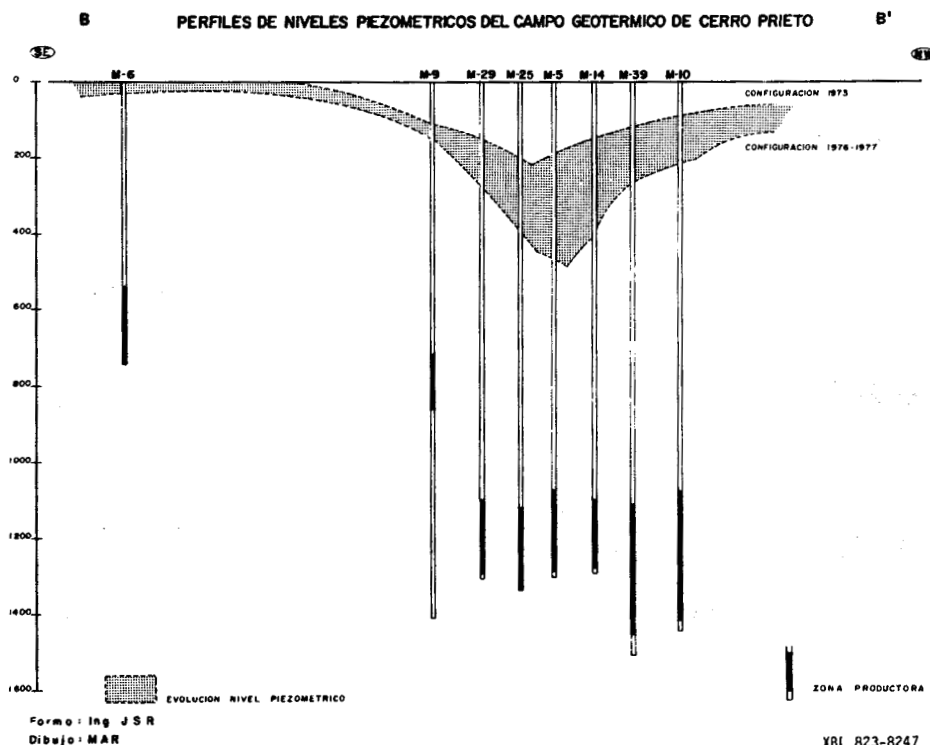
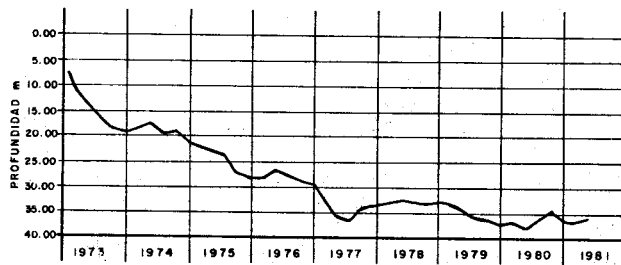


Figura 9. Perfiles de niveles piezométricos del campo geotérmico de Cerro Prieto.

Figure 9. SE-NW section across the production area showing piezometric levels for 1973 and 1976-1977.



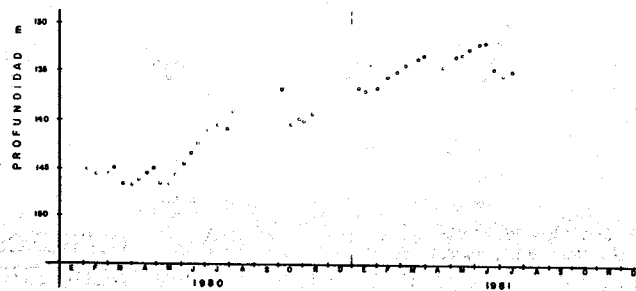
CURVA DE PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMETRICO DEL POZO M-6
CAMPO GEOTERMICO CERRO PRIETO

XBL 823-8248

A

Figura 10. Curva de profundidad del nivel
piezométrico del pozo M-6.

Figure 10. Piezometric levels in well M-6 (depth in m).



CURVA DE PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMETRICO
DEL POZO M-34

Fuente Ing. JES
Dpto. MAH

XBL 823-8249

Figura 11. Curva de profundidad del nivel
piezométrico del pozo M-34.

Figure 11. Piezometric levels in well M-34 (depth in m).

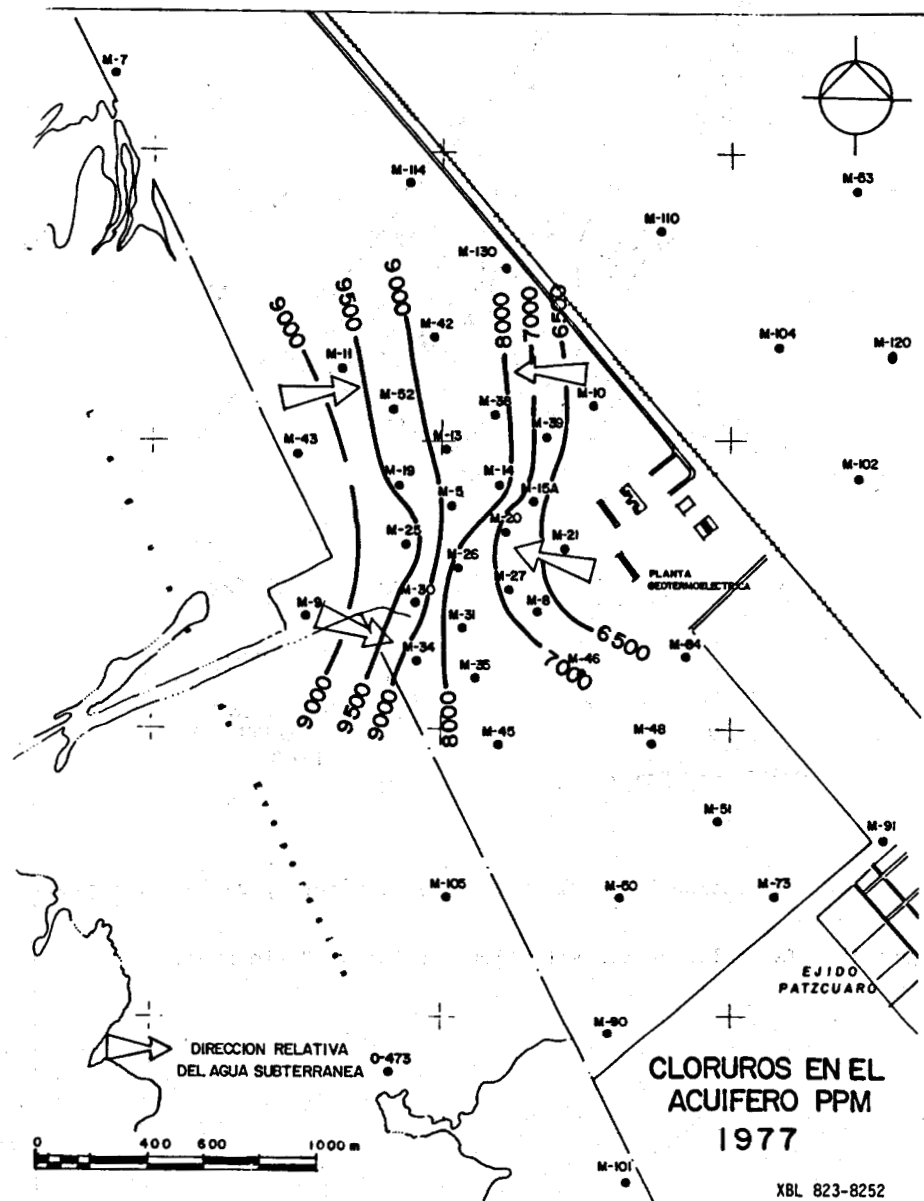


Figura 13. Concentración de cloruros en el acuífero para 1977 (en ppm).

Figure 13. Iso-chloride concentration map for 1977 (in ppm).

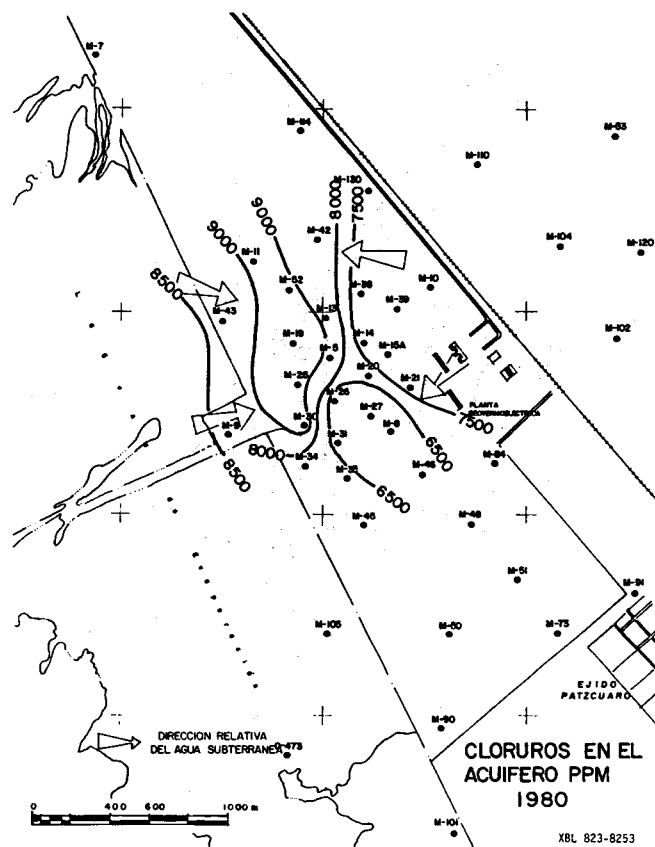


Figura 14. Concentración de cloruros en el acuífero para 1980 (en ppm).

Figure 14. Iso-chloride concentration map for 1980 (in ppm).

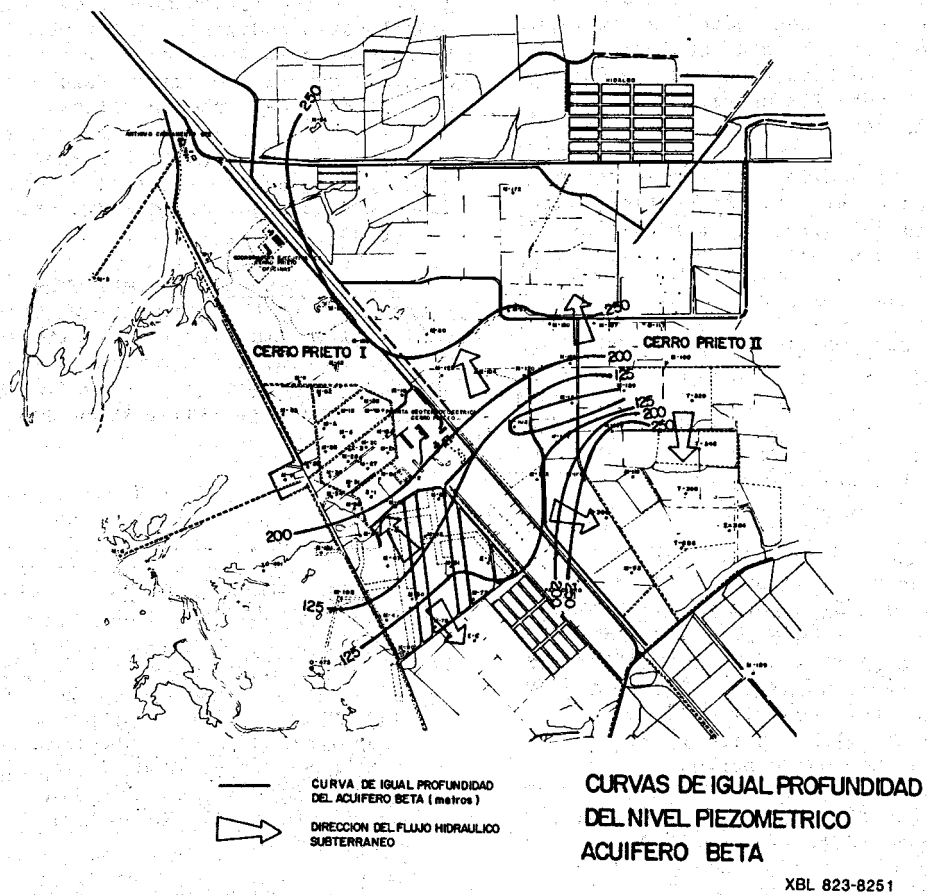


Figura 15. Contornos de igual profundidad del nivel piezométrico - acuífero Beta (en m).

Figure 15. Piezometric map for Beta aquifer (depth in m).

GEOHYDROLOGY OF THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL AQUIFER

ABSTRACT

The present study summarizes the most recent information on the Cerro Prieto geothermal aquifer, with special emphasis on the initial production zone where the wells completed in the Alpha aquifer are located. These wells produce steam for power plant units 1 and 2. Brief comments will also be made on the Beta aquifer, which underlies the Alpha aquifer in the Cerro Prieto I area and which extends to the east to what is known as the Cerro Prieto II and Cerro Prieto III areas. Figure 1 shows the location of the area studied.

The Alpha and Beta aquifers differ in their mineralogy and cementing mineral composition, temperatures, and piezometric levels. For example, in the area of well E-1 we have:

	Piezometric Level	Temperature
Alpha Aquifer Wells M-8, M-31, and M-35	325 m	300°C
Beta Aquifer Well E-1	230 m	330°C

The difference in piezometric levels indicates that there is no local communication between the two aquifers. This situation has been verified by a well interference test, using well E-1 as a producer in the Beta aquifer and well M-46 as the observation well in the Alpha aquifer. No interference between them was observed.

Next we present information on the geology, geohydrology, and geochemistry of Cerro Prieto.

GEOLOGY

Geomorphology

The Cerro Prieto field is located on the flood plain of the Colorado River. It belongs to the "Baja California Ranges" physiographic province, which is joined to the Sonora Desert zone by the Colorado River delta.

Stratigraphy

Upper Cretaceous. This unit is represented in the area by intrusive igneous rocks which form part of the large granitic batholith of the Baja California peninsula. At Cerro Prieto this unit has been reached by well M-3 at 2579 m, well M-96 at 2718 m, and S-262 at 1473 m depth. On the basis of microscopic analysis, this rock has been classified

as a biotite granite. This unit constitutes the basement of the Mexicali Valley.

Tertiary. This unit overlies the granitic basement and consists of shales, silty shales, and sandstones. The shales and silty shales are grey to black in color, the latter corresponding to a greater degree of metamorphism. This unit of fine consolidated sediments is interbedded with fine-to-coarse, white-to-greyish-white sandstones, with abundant quartz and scarce feldspars, cemented by calcium carbonate and/or silica.

The mudstones cover the above sediments and constitute a transition zone between the consolidated and unconsolidated sediments. Usually, they are brown colored.

Pleistocene and Recent. These units are represented by the sediments which form the Mexicali Valley alluvial plain. With regard to composition, origin, and environment of deposition, they are very heterogeneous. According to granulometry they are gravels, sands, silts and clays.

Hydrostratigraphic Units

Three main aquifers have been identified within two stratigraphic units:

1. Alluvial Unit. This unit has been deposited in an alluvial plain and is made up of lacustrine and ancient alluvial deposits. It consists of clays, silts, sands, and some gravels. Its thickness varies from 700 m, in the production zone of Cerro Prieto I wells for units 1 and 2, to 2000 m in well Nuevo León 1, located east of Cerro Prieto I.

The alluvial assemblage is heterogeneous, presenting impermeable and permeable zones. The latter dominate the sandy portions of the ancient channels of the Colorado River, which have been carved over the clayey sediments. The alluvium behaves as a unit of medium to high permeability.

2. Shale and Sandstone Unit. This unit underlies the alluvial and transition zones. In Figure 2, it can be seen that Cerro Prieto I is located between the Cerro Prieto, Michoacán, and Pátzcuaro faults, which bound the basement horst on which this unit rests. The cross sections of Figures 3, 4, and 5 illustrate the structure caused by these faults. In these figures, one can also see that the Alpha aquifer is quite small in size because of these faults. Before being affected by tectonism, it apparently extended towards the northwest (Cerro Prieto II). Its present dimensions are only a fraction of those of the Beta aquifer, and it appears to be only the remainder of a larger reservoir.

GROUNDWATER HYDROLOGY

Alpha Aquifer

The Alpha aquifer is currently being exploited by an average of 20 wells 1300 to 1700 m deep. Lithologically, its producing sandstones are characterized by the presence of calcium carbonate. These sandstones are interbedded with small lenticular bodies of shales and siltstones. Because these bodies are not continuous, they permit vertical fluid flow between the interspersed sandstones. Only when the shales and siltstones form thick continuous layers, such as at the top and bottom of this aquifer, is there an effective caprock which impedes the vertical migration of fluids.

The geothermal capacity of the Alpha aquifer is limited because of its structural emplacement on top of a granitic horst. For this reason, there is no stratigraphic continuity, a situation which causes the following conditions along its periphery:

Towards the northwest and southwest, as one moves away from the production region, the sediments become predominately sandy (wells M-6, M-3, M-7, Q-757, and M-94), and finer sediments, such as shales and siltstones, are rare or absent, i.e., the caprock tends to disappear. This area acts as a good aquifer, one which may be supplying part of the water extracted at Cerro Prieto, although its temperatures are somewhat lower than those of the production zone.

To the northeast, because of the Michoacán fault, shown in Figure 2, the Alpha aquifer is in contact with the alluvial aquifer of the Mexicali Valley (Figure 3), which supplies a large portion of water produced at Cerro Prieto. From the geothermal point of view, the cold waters of this recharge are a drawback.

To the southeast (region of wells M-34, M-8, and M-21), part of the hydraulic recharge came from this area before the wells which supply steam to units 3 and 4 of the power plant were built (1978-1979). When the wells for units 3 and 4 came into operation, much of this very-hot-water recharge was taken up by these wells, and the production of wells supplying units 1 and 2 consequently declined.

Piezometric Maps

The maximum depth of the piezometric level of the Alpha aquifer for 1976 and 1978 is of the order of 450 m, as inferred from the pressure logs (Figure 6). This value was found at the center of Cerro Prieto I in the area of wells M-5, M-25, and M-124. Shallower piezometric levels, with depths of 150 to 200 m, are found in wells M-9, M-114, and M-130. These piezometric level depths can be assumed to be unchanged, since piezometric observations made since those years show minimal variations.

Groundwater Flow

The 1976-1978 piezometric (Figure 6), indi-

cates that the direction of the groundwater flow in the old production area (wells for units 1 and 2) is from the periphery towards the center of the field. Obviously, this flow direction results from the extraction of geothermal water.

In the southeastern portion of the field, where the wells supplying units 3 and 4 are located, the piezometric levels for 1976-1978 indicate that there was a piezometric high in the area of wells M-50, M-51, and M-91 which drained in two main directions: to the northeast, towards the old production area, and to the southeast. Because some of the wells in which this high was detected have their completion interval open to both the Alpha and Beta aquifers, it has not yet been determined whether the piezometric maximum affects one or both aquifers. However, because the piezometric map indicates the flow directions in the geothermal aquifer four years ago, it is likely that most of the above-mentioned groundwater is moving towards the northeast. This is toward the area with the largest number of wells, and therefore the area where most of the geothermal waters are being extracted. It has not been possible to make this data current because most of the wells are under production, and it is not feasible to get pressure logs under restricted flow conditions.

Magnitude of the Drawdown

In the piezometric map for 1970 (Figure 7), the maximum piezometric depth at the center of the field was 200 m. In the 1976-78 map, the maximum depth was about 450 m, which indicates a maximum drawdown of 300 m. This represents a pressure drop of 30 kg/1300 m depth, which is the average depth of the Alpha aquifer. The average drawdown in all of the zone supplying units 1 and 2 was 144.6 m (14.46 kg/cm^2).

The cross sections of Figures 8 and 9 illustrate the changes in piezometric level for the 1973-1977 period. Figure 8 shows a northwest-southeast section from well M-11 to well M-51; and Figure 9, a southwest-northeast section from well M-6 to well M-10.

Hydrodynamic Properties of the Aquifer

Based on the drawdown observed in the production zone and in well M-6 and by applying the Theis and Jacob equations, we estimated a transmissivity of $0.0034 \text{ m}^2/\text{s}$ and a storage coefficient of 0.005. Using these values in the geohydrologic equations, we get similar drawdowns to those observed in the aquifer. Furthermore, from these equations and from the variations in pressures and piezometric levels in observation wells, we inferred that the aquifer has reached a hydrodynamic equilibrium. This is substantiated by the minimal changes in piezometric levels in the last few years. In fact, some recoveries have been observed, as illustrated in Figures 10 and 11 corresponding to the drawdown curves for wells M-6 and M-34, the latter located in the production area.

Using Darcy's equation, we estimated the effective water velocity at the periphery of the

field, between wells M-9 and M-29, and obtained a value of about 2 m/day, a value which we hope to verify next August by performing an injection test using radioisotopes.

Conclusion

Because of the high permeability of the aquifer there are no hydrogeologic problems with regard to sufficient water supply. However, this feature and the temperature distribution act as limiting factors to the effective exploitation of the geothermal energy because a higher rate of production implies a higher rate of groundwater flow from the periphery towards the center of the field. Therefore water-rock contact time decreases, thus giving the water less time to extract heat from the rock. This situation becomes critical especially in the eastern part of the field where, because of the structural features of the area, the hydraulic recharge is from the cold water alluvial aquifer which bounds the reservoir.

CHLORIDE GEOCHEMISTRY

To complement and verify the deductions reached from geohydrologic information, we studied the chloride concentration in the geothermal fluids and its variation with time. Chlorides have proven to be a very useful tool for inferring the direction and source of the ground water recharge. This is true because the concentration of chlorides in water is affected very little by interactions with the high temperature rocks but can be significantly affected by boiling or mixture of waters of different chloride concentration.

In the present study, we used the aquifer chloride concentration computed from the concentrations at atmospheric pressure. The following equations were used:

$$Cac = Car (1-f)$$

$$f = (ha-h100)/\lambda$$

where

Cac = Concentration in the aquifer

Car = Concentration under atmospheric pressure

f = Evaporated water fraction

ha = Enthalpy of the aquifer water

h100 = Enthalpy of water of 100°C and atmospheric pressure

λ = latent heat of vaporization at 100°C

Iso-Chloride Concentration Map for 1975

Using the values of aquifer chloride concentration, we prepared iso-chloride concentration maps for 1975, 1977 and 1980. The iso-chloride concentration map (Figure 12) shows that the max-

imum concentrations were found at the center of the old field (Cerro Prieto I) in wells M-26, M-25, M-19, and M-30, with values of 10,315, 9779, 9636, and 9597 ppm, respectively. Lower concentrations were found towards the east in well M-15 (7592 ppm), and to the west in well M-9 (7720 ppm). The eastern part of Cerro Prieto I has lower concentrations due to the contribution of less saline waters coming from the Mexicali Valley alluvial aquifer, which bounds the field laterally.

Well M-21 displayed a high chloride concentration which could be due to the influence of a minor fracture or fault supplying geothermal fluids of different chemical composition. This was deduced from the fact that this well has always had rather peculiar characteristics which have set it apart from most of the other wells.

Iso-Chloride Concentration Map for 1977

The map in Figure 13 shows that the maximum concentrations appear at the center of Cerro Prieto I in wells M-19 and M-25, with 9484 and 9560 ppm, respectively. The lowest concentrations were obtained in well M-15A, (6700 ppm) and M-139 (6,708 ppm), both in the eastern portion of Cerro Prieto I, and in well M-9 (7,356 ppm) in the western portion.

This data indicates that, since 1975, there have been minimal decreases (200-250 ppm) over the central portion of the area, whereas in the eastern portion of the area, differences of up to 900 ppm were observed (well M-15A). This drop in chloride content suggests that the Alpha aquifer is being replenished by waters from the Mexicali Valley alluvial aquifer, which in this region contains colder and less-saline waters, i.e., with a lower chloride content. As it flows towards the Cerro Prieto I production zone, this water dilutes the waters of the geothermal aquifer, originally characterized by their high chloride content.

On the western flank, the chlorides varied to a lesser extent because, in this part of the field, the bounding alluvial aquifers have only a slightly lower chloride concentration than that of the geothermal aquifer, according to the analysis of waters from well M-6 and from the shallow wells BCP-5, 13, 19, and 11.

Iso-Chloride Concentration Map for 1980

The map in Figure 14 shows that the highest concentrations are found at the center of the area in well M-30, with values of 8857 and 9325 ppm and differences of up to 500 ppm in 1977. Toward the eastern flank, changes of the order of 1,100 ppm were observed in well M-14 and 2,245 ppm in well M-21.

This decline in chloride concentration, especially in the eastern portion, indicates that the Cerro Prieto I field, currently under production, is being affected by the entry of cooler waters with a lower chloride concentration. The contour maps and the variations in the aquifer chloride concentration clearly indicate where the recharge

of different quality waters is coming from, and confirm the direction of groundwater flow inferred from geohydrology. For this reason, we consider geochemistry to be a very useful geohydrological tool.

BETA AQUIFER

West of the Michoacán fault, the Beta aquifer is located under the Alpha aquifer. East of that fault, it comprises the new Cerro Prieto II and Cerro Prieto III areas which are under development. From what is presently known, this aquifer covers an area of about 20 km².

The depths of the wells that have been completed in this aquifer vary between 2000 and 3000 m, a favorable situation for geothermal production, since heat and mass could be extracted

from a thickness of at least 1000 m. Furthermore, the thickness of the producing sandstones are at least three times greater than those of the Alpha aquifer.

Piezometric Map

Based on pressure logs obtained in wells completed in the Beta aquifer a piezometric map was prepared (Figure 15). A piezometric high can be seen in the area of wells M-102, M-107, and M-109 which drains in two main directions: towards the northwest and southeast. This piezometric high can also be observed in Cerro Prieto I, in the area of wells M-50, M-51, and M-48, and appears to be due to a zone of higher permeability caused by fracturing. This is inferred from the alignment of the higher temperature isotherms in this zone, which is similar to that of the piezometric high.

CERRO PRIETO SYMPOSIUM/SIMPOSIO III

**GEOPHYSICS
GEOFISICA**

