

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA



EVALUACION DEL POTENCIAL GEOTERMICO
DEL ACUIFERO DE CERRO PRIETO

T B S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A

MIGUEL ANGEL DOMINQUEZ CORTAZAR

MEXICO, D. F.

1980



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
ARGENTINA

FACULTAD DE INGENIERIA
EXAMENES PROFESIONALES
60-1-60

Al Pasante señor MIGUEL ANGEL DOMINGUEZ CORTAZAR,
P r e s e n t e .

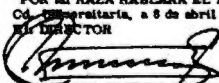
En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Profesor M. I. Molade Beretowsky Verdusco, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero CIVIL.

"EVALUACION DEL POTENCIAL DEL ACUIFERO GEOTERMICO
DE CERRO PRIETO"

1. Aspectos generales
2. Descripción del acuífero geotérmico e información disponible
3. Balance geohidrológico
4. Balance térmico
5. Conclusiones

Después a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo máximo de seis meses como requisito indispensable para sostener Examen Profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Suplementaria, a 8 de abril de 1960
EL DIRECTOR


ING. JAVIER JIMENEZ ESPRIU


JEB/CG/201/enc

INDICE

pág.

INTRODUCCION

CAPITULO 1

3

ASPECTOS GENERALES

1.1	Definición	3
1.2	Transferencia de Calor	4
1.2.1	Transferencia por Conducción	4
1.2.2	Transferencia por Convección	6
1.3	Clasificación de Sistemas Geotérmicos	7
1.4	Utilización de la Energía Geotérmica	8
1.4.1	Aprovechamiento de las regiones Productoras de Vapor.	9
1.4.2	Aprovechamiento de las regiones Productoras de Agua y Vapor.	11

CAPITULO 2

DESCRIPCION DE LA INFORMACION RECOPIADA

2.1	Descripción del Campo Geotérmico de Cerro Prieto	14
2.2	Localización	15
2.3	Geología	16

2.4	Geohidrología	16
2.4.1	Pneumetría	18
2.5	Información Adicional	19

CAPITULO 3

BALANCE GEIDROLOGICO

3.1	Cálculo del Gasto Promedio	21
3.2	Cálculo de las Características Geohidrológicas	22
3.3	Predicción de Abatimientos Futuros	33
3.4	Planteamiento de un Modelo Matemático	35
3.4.1	Ecuaciones del Movimiento	35
3.4.2	Planteo del Modelo	37
3.4.3	Programa para computadora Digital	42
3.4.4	Aplicación al Acuífero de Cerro Prieto	44

CAPITULO 4

BALANCE TERMICO

4.1	Consideraciones Generales	48
4.2	Determinación de Flujos de Calor	58
4.2.1	Flujo Lateral	50
4.2.2	Flujo Vertical	51
4.3	Determinación del Contenido de Calor	52
4.4	Balanza Térmica	56

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

1. INTRODUCCION

Bien sabidos son los requerimientos energéticos para el desarrollo del país; entre estos es el petróleo el energético que ocupa el lugar primordial, además siendo del tipo no renovable. Es inevitable la búsqueda de fuentes alternas que racionalicen este tipo de recursos naturales evitando el consumo innecesario de hidrocarburos a fin de que estos se destinen a otras regiones del desarrollo en donde son insustituibles o de mayor rendimiento económico.

Dentro de las fuentes alternas se encuentra la geotérmica; esta fuente utiliza el más barato de los combustibles que domina actualmente la tecnología: vapor endógeno que brota de las profundidades de la tierra, que a muy elevadas temperaturas, acciona gigantescas turbinas.

Puede decirse que este tipo de aprovechamiento es bastante reciente en comparación con otros tipos (aprovechamiento de cuencas hidráulicas por ejemplo) y aún en vías de un amplio desarrollo en México. Sin embargo es interesante conocer como de este tipo de aprovechamiento es posible lograr un ahorro del energético más vital (petróleo). En los primeros 6 años de operación de la planta de Cerro Prieto se ha producido una energía que representa un ahorro de seis millones de barriles de combustible (Ref. 13).

Dada las características geológicas de México, con zonas de volcanismo activo, áreas de debilidad cortical y manifestaciones tectónicas, existen por lo menos 180 áreas geotérmicas en la Península de Baja California, en la Sierra Madre Occidental, en el Eje Neovolcánico y en el Macizo de Chiapas, cuya evaluación permite estimar que México podría generar, de aquí al año 2,000, unos 20 mil millones de kilowatts-hora -- anualmente con energía geotérmica. De ahí la importancia e interés que representa el desarrollo del tema en el presente trabajo.

ASPECTOS GENERALES

Definición de Geotermia

define a la geotermia como el estudio de la distribución de temperatura en la tierra y los fenómenos que son influenciados por dicha distribución.

geotermia se enfoca principalmente al estudio de aquellas zonas en donde el gradiente geotérmico es mayor al normal (aproximadamente 30°C por kilómetro); estas regiones son conocidas comúnmente como depósitos térmicos.

re al origen y/o la formación de la mayoría de los depósitos geotérmicos existen diversas teorías debido a que, necesariamente ocurren un número de factores que los identifican y hacen diferentes. En general se puede definir la formación de un depósito geotérmico como la migración y atrapamiento de una masa magmática a una cierta profundidad la cual al liberar calor y gases durante su proceso de cristalización y enfriamiento incrementa grandemente la temperatura de acuíferos profundos.

y provoca migración vertical de fluido y calor a través de fallas y fracturas (ref. 1).

1.2 Transferencia de Calor.

Bien es sabida la existencia de altas temperaturas en el núcleo interno de la tierra; se tratará en este punto de explicar los distintos procesos por medio de los cuales dicho calor es transportado a zonas más superficiales en donde puede ser aprovechado en beneficio del hombre.

Son tres los procesos en los cuales se transporta el calor: por conducción, en el cual el transporte ocurre gradualmente a través de un cuerpo que puede ser sólido; por convección, en el cual un fluido se mueve en un circuito cerrado transportando el calor. Este movimiento puede ser causado por diferencias en la densidad del fluido, lo que a su vez puede ser provocado por diferencias en la temperatura del mismo; el último proceso es por radiación.

1.2.1 Transferencia por Conducción.

Si la temperatura de un cuerpo (que puede ser sólido), no es uniforme, se tendrá una transferencia de calor la cual puede caracterizarse como un flujo. Flujo en este caso, es la cantidad de calor que pasa a través de una superficie imaginaria por unidad de área por unidad de tiempo, este flujo valdrá cero, si la temperatura del cuerpo es uniforme, si dicha tem-

peratura no es uniforme, entonces el flujo será linealmente dependiente - del gradiente térmico y podrá escribirse como:

$$q = K \text{ grad } \Theta$$

donde

q flujo de calor

K conductividad de los cuerpos

$\text{grad } \Theta$ vector que representa el gradiente térmico

Para cuerpos anisótropos el flujo y el gradiente térmico no tienen la misma dirección; esto es debido principalmente a la propia anisotropía de los cuerpos.

La conductividad de los materiales puede medirse directamente y de formas diferentes; en general las rocas tienen un coeficiente de conductividad -- bastante menor al de los materiales. Ejemplos de algunos valores en las rocas son los siguientes:

Roca	Conductividad (K)
Granito	$5.7 \times 10^{-3} \text{ cal/cm.s. } ^\circ\text{C}$
Dunite	$12 \times 10^{-3} \text{ cal/cm. s. } ^\circ\text{C}$
Caliza	$5 \text{ a } 7 \times 10^{-3} \text{ cal/cm. s. } ^\circ\text{C}$
Marmol	$7.5 \times 10^{-3} \text{ cal/cm. s. } ^\circ\text{C}$
Dolomita	$10. \times 10^{-3} \text{ cal/cm. s. } ^\circ\text{C}$

1.3.2 Transferencia por Convección

La convección es generalmente un medio de transporte para el calor, por medio de un movimiento libre de fluido entre dos superficies a diferentes temperaturas. La energía convectiva es proporcionada por diferentes densidades entre el fluido caliente y el fluido frío.

Por otra parte, se sabe que la corteza terrestre a poca profundidad (desde el punto de vista geológico), está constituida básicamente de material sedimentario, extendido en estratos. Estos estratos tendrán diferentes permeabilidades dependiendo de sus componentes, textura, historia etc. Por ejemplo, algunos son altamente permeables como resultado de haberse formado a partir de material grueso ó muy fracturado y otros, con una relativa impermeabilidad. En esas circunstancias el agua meteórica en los estratos superiores de la corteza, fluye de varias formas a través de las zonas más permeables y en algunos casos penetrará en regiones más profundas pudiendo llegar a encontrarse con un material magmático proveniente de zonas todavía más profundas; esto daría como resultado la formación de un proceso convectivo. Lógicamente, el agua circulará por las rocas más porosas, hipótesis que está ligada con la roca misma, esto da lugar a pensar que el agua tiene la misma temperatura que la roca en todos los puntos en contacto. Sin embargo, en el caso de existir un gradiente de temperatura (temperatura no uniforme), se tendrá una transferencia de calor por conducción en adición a la que se tiene por convección.

El tamaño y forma de las corrientes convectivas, así como sus presiones, temperaturas, distribución de fases y contenido de sales, serán tan variados como la estructura geológica de la corteza terrestre; porque es precisamente esta estructura la que determina esas características. Como ilustración se presentan en la figura 1.1 a dos modelos simplificados que representan típicamente a flujos convectivos transportando el calor desde la fuente magmática hacia las regiones superiores de la tierra donde pueden ser utilizadas.

Actualmente se tienen zonas detectadas en donde es posible aprovechar esta energía, dos de estas zonas son: el campo geotérmico de Cerro Prieto en México a cuyo estudio se enfoca esta tesis y el campo Wairakei en Nueva Zelanda cuyo modelo de corrientes convectivas se muestra en la figura 1.2.

Los sistemas geotérmicos se distinguen unos de otros por el tipo de proceso con el cual fluye el calor hacia la superficie; por ésto se tienen sistemas conductivos y sistemas convectivos.

1.3. Clasificación de Sistemas Geotérmicos

Necesariamente las diferentes temperaturas y fluidos geotérmicos definirán el tipo de un depósito geotérmico.

Se presenta a continuación una clasificación publicada en la circular 726

del USGS 1975 (ref. 3).

1.- Sistemas convectivos hidrotérmicos

- a) . Sistemas de vapor dominante $\sim 240^{\circ}\text{C}$
- b) . Sistemas de agua dominante
 - 1). Sistemas de alta temperatura $> 150^{\circ}\text{C}$
 - 2). Sistemas de temperatura intermedia $150^{\circ}\text{C} \text{ a } 90^{\circ}\text{C}$
 - 3). Sistemas de baja temperatura $< 90^{\circ}\text{C}$

2.- Sistemas ígneos calientes

- a). Rocas parcialmente fundidas $> 550^{\circ}\text{C}$
- b). Rocas secas calientes $< 650^{\circ}\text{C}$

3.- Sistemas conductivos (incluyen los dep $\acute{o}$ sitos geopresurizados) $15^{\circ}\text{C} \text{ a } 300^{\circ}\text{C}$

En los sistemas geopresurizados, el agua caliente queda atrapada entre estratos, en los cuales la presión excede de la hidrostática, debido a la - compresión que sufren dichos estratos por las capas superiores. Estos sistemas son creados en el Golfo de México, donde están también presentes el gas y el aceite a lo largo de todo el depósito.

1.4. Utilización de la Energía Geotérmica.

Dentro de los sistemas geotérmicos existentes, se tienen tres casos en los cuales es posible aprovechar la energía geotérmica; estos casos se tienen en aquellos lugares que: solamente suministran vapor; suministran gran --

cantidad de agua caliente que puede ser parcialmente vaporizada debido a una "caída" de presión y este vapor a su vez puede utilizarse para la producción de energía; y finalmente, aquellos lugares en los cuales el calor contenido en el agua puede utilizarse sin vaporización. A continuación se examinan los dos primeros casos por ser los más comunes.

1.4.1 Aprovechamiento de los Lugares que Suministran Vapor.

Un ejemplo clásico de este caso es el de Lardarello en Toscana, Italia, - de donde se tiene conocimiento de ser de los primeros lugares de aprovechamiento de la energía geotérmica. La producción de energía ha alcanzado 250, 000 Kw. Las regiones geotérmicas en los geysers de California - son otro ejemplo de estos campos de vapor; este campo se extiende sobre un área de 25 Km² y ha alcanzado una producción de 396,000 Kw (octubre de 1973) y ha continuado incrementando su producción en el transcurso de los últimos años.

La producción de energía eléctrica en estos campos sigue en forma muy - general el siguiente procedimiento.

Con base en estudios geofísicos se determinan los sitios en los cuales - se han de perforar los pozos productores. La perforación de estos pozos - se lleva a cabo utilizando lodos de enfriamiento, evitando así el excesivo calentamiento del equipo de perforación. Una vez que los pozos están abiertos el vapor escapa hacia la atmósfera, expandiéndose en forma adia-

betico; esta expansión tiende a la presión atmosférica una vez que se humedece. Esto es debido a que el vapor contiene aproximadamente 25% -- (en masa) de agua en suspensión.

Después de esto el vapor aparecerá sobre la superficie como una columna de humo blanco; después de varios días el vapor se mezcla libremente con el aire transparentándose y condensándose solo si el aire es frío.

Después de que se han dado las condiciones necesarias (equilibrio entre la temperatura de las paredes de la perforación y el flujo de vapor), se conecta el pozo perforado con la red de separadores hasta las entradas de las turbinas, la conexión se lleva a cabo por medio de tuberías con un diámetro lo suficientemente grande (el flujo máxico puede ser de cientos de toneladas en horas, y una tonelada de vapor ocupa 279 m^3 a una presión aproximada de 7 bars). Estas tuberías se ordenan de una manera tal que puedan dilatarse libremente, pero que a su vez no presenten problemas al condensarse el agua. Los separadores tienen la función de separar el agua y vapor antes de entrar a la turbina en donde se utiliza solo éste último.

La regularización del flujo como una función de la producción de energía eléctrica es controlada por reguladores, también a la entrada de la turbina. Estos reguladores mantienen el flujo de vapor a una cierta presión -- que a veces es muy diferente de la presión de diseño de la turbina. Debido a esto es necesario escoger entre la presión que produzca la máxima

producción de energía la cual corresponde a una presión alta con un flujo alto ó una presión que produzca una alta eficiencia en kilowatts por kilogramo de vapor por hora, la cual requiere también una presión alta pero con un flujo menor.

Esta es una elección delicada que requiere de un conocimiento previo de la capacidad de producción de los pozos. Sin embargo en la práctica es común encontrar que las plantas trabajen a una presión menor que la de diseño lo cual podría hacer pensar que la planta está trabajando con una presión de diseño alta o que la misma está sobreequipada. Es común en estos casos, incrementando el número de los pozos productores lo cual extendería el área del campo de explotación.

1.4.2 Explotación Geotérmica de Zonas Productoras de Agua y Vapor (sistemas de agua dominante)

En un acuífero geotérmico del tipo líquido dominante, se extrae una mezcla de vapor y agua. Se perforan una serie de pozos. La perforación se detiene donde se detecta, además de pérdida de lodos una fuente anómala térmica.

Una vez que se termina el pozo y al éste se deja en reposo se da un equilibrio térmico entre el pozo y el terreno circundante. Debido a las altas temperaturas, parte de la columna en el pozo es ocupada por vapor.

Para iniciar la producción, si hay vapor suficiente se necesita solamente

abrir la válvula del cabezal; la presión descende en el pozo y la columna de agua empieza a cambiar de fase y el vapor irá arrastrando agua, hasta que se establezca un flujo dado. Si el flujo no se inicia espontáneamente, es necesario inducirlo subiendo parte de la columna.

Esto puede hacerse inyectando aire comprimido o espumantes y agitando el fluido en el pozo.

Durante el curso de esta operación de inducción el agua fluye del subsuelo hacia el pozo por las fisuras y aun por las paredes del recubrimiento - del pozo. Parte de esta agua se evapora por la disminución de la presión. La proporción en peso de agua transformada en vapor puede calcularse fácilmente. Sea por ejemplo, $\Theta 1$ la temperatura inicial del flujo, $\Theta 2$ la del punto de ebullición del agua a la presión dentro del pozo y L el calor presente de vaporización a esa temperatura. La proporción X es tal que --

$$X L = \Theta 1 - \Theta 2$$
Sin embargo X es bastante menor que la unidad (i. e. a lo más) puede decirse entonces que el volumen de vapor es grande con respecto al volumen de agua, el agua por lo tanto se reduce a una suspensión en los flujos de vapor los cuales pueden extenderse a una gran velocidad.

La utilización de un sistema de este tipo hace también necesaria la separación del vapor y agua, esto se hace por medio de separadores, que en esencia consisten en un tanque grande vertical (Fig. 1.3) al cual el flujo de vapor entra tangencialmente, el vapor se extrae de la parte superior del tanque, mientras que el agua se acumula en la base del mismo.

El vapor acumulado en estos separadores es enviado a las turbinas por medio de un sistema de tuberías .

En los dos sistemas operativos mencionados anteriormente, se tienen un cierto número de pozos interconectados en paralelo con una misma red de colectores, esto puede presentar el inconveniente de que en un momento dado, un pozo puede parar su producción sin tener noticias de ello, por esto se hace necesario tomar medidas periódicamente en todos los pozos productores; en la práctica estas mediciones se hacen por lo general a - cada mes.

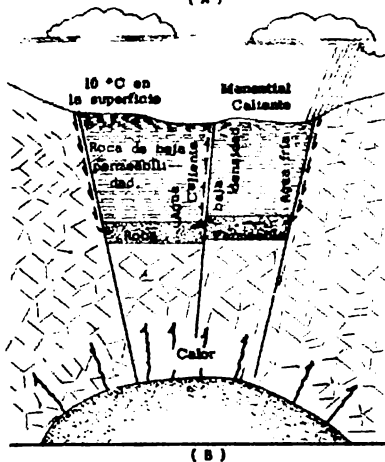
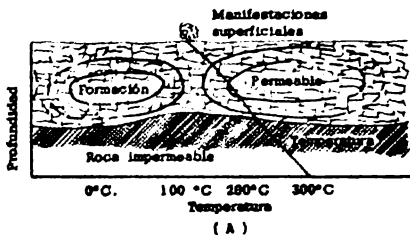


Fig. 1.1 A) DISTRIBUCION DE TEMPERATURA EN EL FLUJO DEL AGUA

B) UN EFECTO DE LA VARIACION DE LA PERMEABILIDAD EN REGIONES CON FLUJO.

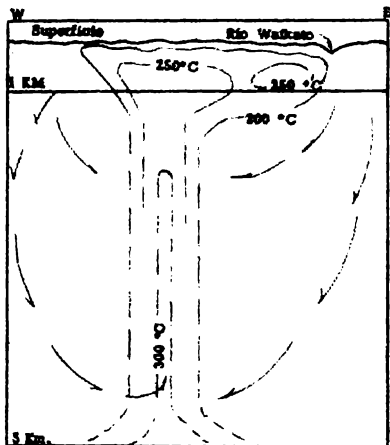


Fig. 1.2 SECCION TRANSVERSAL DEL DEPOSITO GEOTERMICO DE
WAIKAKEI NUEVA ZELANDIA. ESTIMACION DE ISOTERMAS A 6 KM.
DE PROFUNDIDAD.

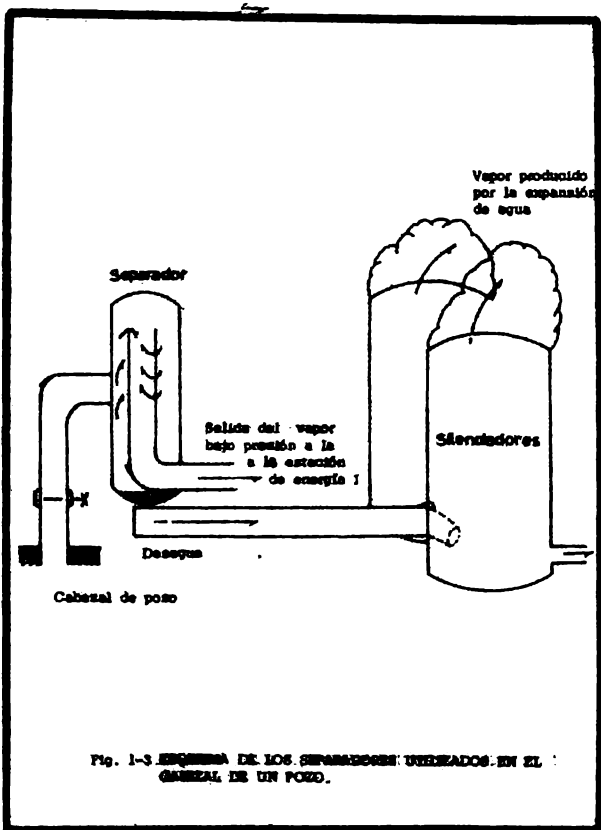


Fig. 1-S. ESQUEMA DE LOS SEPARADORES UTILIZADOS EN EL CAJERAL DE UN POZO.

2. DESCRIPCION DE LA DEFORMACION RECOPIADA

2.1 Descripción del campo geotérmico de Cerro Prieto.

Cerro Prieto es la zona más conocida de todas las zonas geotérmicas del país. La interpretación y correlación de los diversos estudios geológicos y geofísicos unidos con los resultados obtenidos de los pozos perforados dieron una clara indicación de la gran potencialidad del campo.

En Cerro Prieto se ha encontrado un sistema geotérmico del tipo agua dominante, se han perforado en total 37 pozos (año de 1975) de los cuales 30 han sido productores, la mayor parte con excelente descarga de una mezcla de agua y vapor con presiones en el cabezal de hasta 20 kg/cm² y temperaturas medidas en el fondo de 371 °C. Los estratos productores se tienen en algunos pozos de los 600 a los 900 m. de profundidad, en otros de 1 300 a 1 500 m. y en el más profundo de 1 800 a 2 000 m.

Una vez que se contó con el suficiente número de pozos y fue probada su capacidad, fueron instalados dos turbogeneradores de 37 500 kw c/u. Los cuales son mantenidos en operación con el vapor aportados por 15 pozos productores. La generación se ha efectuado sin trópezos desde 1973.

Un esquema del campo se muestra en la figura 2.1.

2.2 Localización

La zona de Cerro Prieto se localiza en la parte central del valle de Mexicali. Es una zona volcánica constituida por lavas basálticas conocidas como Cerro Prieto y que da nombre a la zona de manifestaciones térmicas.

Geográficamente la zona geotérmica está localizada en la parte noroeste -- de la República Mexicana y en el extremo norte de la Península de Baja -- California, entre los meridianos 114 °y 118 °longitud oeste y entre los paralelos 31°y 32° latitud norte. Está limitado por el Golfo de California al sur y al oeste por la Sierra de los Cucapas.

El área está caracterizada por un clima árido, siendo extremadamente caliente en verano y frío en invierno. El suelo es principalmente árido y -- arenoso excepto al este del valle donde existen zonas de riego que convierten a la región en una de alta fertilidad aportando excelentes cosechas como el trigo y la alfalfa.

La zona geotérmica está caracterizada por manantiales de fodo caliente, -- suelos pantanosos, etc. Esta zona cubre una extensión aproximada de -- 30 km².

2.3 Geología

Un esquema del campo se muestra en la figura 2.1.

2.2 Localización

La zona de Cerro Prieto se localiza en la parte central del valle de Mexicali. Es una zona volcánica constituida por lavas basálticas conocidas como Cerro Prieto y que da nombre a la zona de manifestaciones térmicas.

Geográficamente la zona geotérmica está localizada en la parte noroeste de la República Mexicana y en el extremo norte de la Península de Baja California, entre los meridianos 114 °y 115 °longitud oeste y entre los paralelos 31°y 32° latitud norte. Está limitado por el Golfo de California en el sur y al oeste por la Sierra de los Cucapas.

El área está caracterizada por un clima árido, siendo extremadamente caliente en verano y frío en invierno. El suelo es principalmente árido y arenoso excepto al este del valle donde existen zonas de riego que convierten a la región en una de alta fertilidad aportando excelentes cosechas como el trigo y la alfalfa.

La zona geotérmica está caracterizada por manantiales de agua caliente, suelos pantanosos, etc. Esta zona cubre una extensión aproximada de 30 km².

2.3 Geología

El conocimiento sobre la geología de la zona, está basado en estudios geofísicos efectuados aunado a las columnas estratigráficas de los pozos perforados. Estos estudios permiten delimitar a la zona de explotación localizada sobre una zona de fallas que a su vez está alineada con una gran falla cuyo eje corre desde San Francisco U.S.A. hacia Centro y Sudamérica.

Esta falla principal sigue una dirección sureste, y perpendiculares a ésta se tienen fallas secundarias. Debido a éso se tiene en la zona en estudio un basamento granítico bastante fracturado.

Sobre el fondo granítico existen una serie de estratos discontinuos de lutitas y areniscas fracturadas que constituyen propiamente al acuífero con un espesor promedio de 2 000 mts. Sobre el acuífero con espesores variables (400 a 2 500 m) se tiene un estrato de arcilla plástica que actúa como un sello para el mismo y finalmente se tienen depósitos sedimentarios fluviales con un espesor aproximado de 100 m. y que constituye el acuífero freático explotado exclusivamente para irrigación en la región noroeste del campo geotérmico. Un esquema de la geología del depósito se muestra en la figure. 2.2.

2.4 Geohidrología

2.4.1 Piezometría. La evolución de los niveles piezométricos es una de las respuestas de un acuífero en explotación de mayor utilidad para conocer sus propiedades.

2.4.1.1. Evolución de niveles en pozos de observación .

Existen varios pozos en los que se han instalado limnigrafs; por parte de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; ya que no se utilizaron como pozos productores. De éstos, dos en especial tienen una evolución de utilidad para el estudio, gracias a que no se ven afectados por cambios locales de explotación: El pozo M-6, no explotado por tener una temperatura relativamente baja en su base (150 °C) , con registro de niveles -- desde 1973 a la fecha (octubre de 1976) muestra un abatimiento paulatino por estar alejado (2.3 km) del grupo de pozos en explotación. El pozo M-10 no fue explotado debido a defectos en su terminación ; se selló por temor a un posible asentamiento en la planta debido a su cercanía a este. Sin embargo es posible que debido a alguna falla en el sello, el nivel piezométrico en este pozo ha respondido a la explotación en forma paulatina y es tomado como representativo del nivel del campo de pozos en explotación por su cercanía al mismo.

Existen otros pozos no explotados en condiciones similares como el M-23, que tienen sin embargo variaciones que reflejan cambios en la explotación de pozos cercanos. La observación de su nivel será de utilidad si se reporta además la extracción de los pozos.

La evolución del nivel piezométrico en los pozos de observación M-6 y M-10 servirá para el análisis geohidrológico y poder hacer un análisis de las propiedades promedio del acuífero, esto es la transmisibilidad, coe -

ciente de almacenamiento, y podrías dar una idea aproximada de las propiedades del material confinante. Con esta información se podrá hacer una predicción de la evolución piezométrica a futuro en el campo y a diferentes políticas de explotación. Se presenta en las figuras 2.3 y 2.4 la evolución de la historia piezométrica de estos dos pozos.

2.4.1.2, Piezometría de Pozos Superficiales.

La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos tiene un conjunto de pozos piloto en el valle de Mexicali para la observación de los niveles piezométricos en el acuífero superficial que es aprovechado como ya se dijo para fines de riego. Las observaciones en estos pozos se llevan desde 1950, lo que ha permitido tener la historia de las evoluciones de niveles piezométricos en el valle y además una configuración de la red de flujo cuando apenas se iniciaba la explotación del agua subterránea; representando las condiciones naturales de flujo en el acuífero superficial. Esto permite tener un panorama más amplio del flujo regional extrapolando las configuraciones iniciales (véase fig. 2.5) .

El conocimiento de la historia piezométrica del acuífero superior (freatico) es de importancia debido a que es posible que una de las fuentes de recarga del acuífero geotérmico es precisamente el flujo vertical hacia abajo a través de la copa superior ó a través de los conductos abiertos por manifestaciones termales o a través de fallas en el área de explotación.

2.4.1.3 Cantidad de agua extraída;

El conocimiento exacto de la masa de agua extraída es obviamente un parámetro clave en la evaluación del comportamiento futuro del acuífero; ya que es justamente la excitación que produce cambios en el sistema en estudio.

Con base en la información disponible, La Comisión Federal de Electricidad por medio de la Coordinadora de Cerro Prieto ha elaborado una historia de extracciones a partir de marzo de 1973. Esta información se resume en la curva de masas extraídas acumuladas de la fig. 2.8.

En esta figura puede apreciarse que la calidad de la mezcla en promedio para el acuífero es del orden del 25%, hasta mediados de 1975, aumentándose un poco hasta 1977, y que la cantidad de agua extraída sin aprovechar se es considerable.

3.5 Información Adicional.

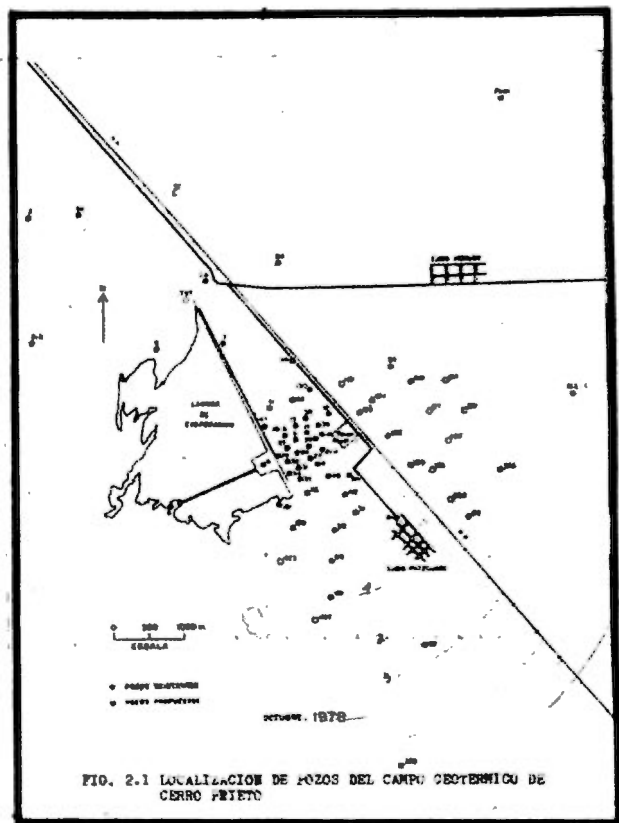
Otras informaciones interesantes basadas en la integración de la información recopilada son:

1.- El campo geotérmico de Cerro Prieto hasta el momento tiene flujo interno en fase líquida. El cambio rápido de fase se da dentro de los pozos o cerca de ellos. El agua dentro del acuífero circula principalmente por las capas permeables: la superior, de arenas y areniscas fracturadas y la más profunda de arenisca fracturada con menor permeabilidad que la pri

mera.

2.- Las zonas del ecuifero con temperaturas lo suficientemente altas como para ser explotadas para generación de energía eléctrica tienen una extensión en área de aproximadamente 6 km² y la fuente de calor, si aún está activa, se encontraría en la zona basal, bajo las capas permeables.

3.- Desde la fecha de inicio de la explotación hasta ahora - (fecha de la información recopilada), los niveles piezométricos muestran abatimientos del orden de 50 m. en el pozo M-10 dentro del campo de pozos, y de 15 m en el pozo M-6, situado a una distancia de aproximadamente 1 200 m. del centro del campo de explotación. Se espera que manteniendo al mismo ritmo de extracción en los últimos años el abatimiento adicional sea un poco menor.



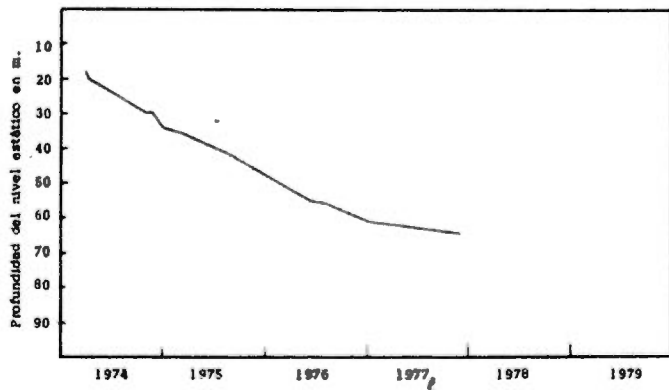


Fig. 2.4 HISTORIA PIEZOMETRICA DEL POZO M-10

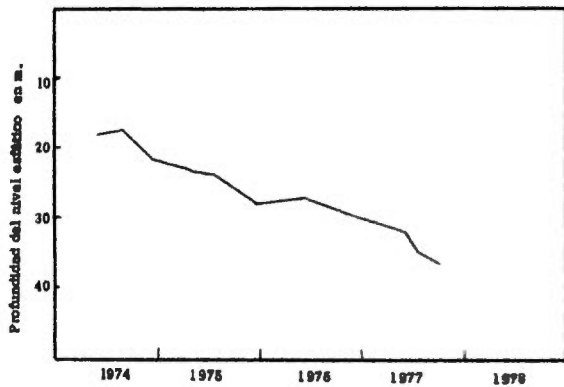


Fig. 2-3

HISTORIA PIEZOMETRICA DEL POZO N-6

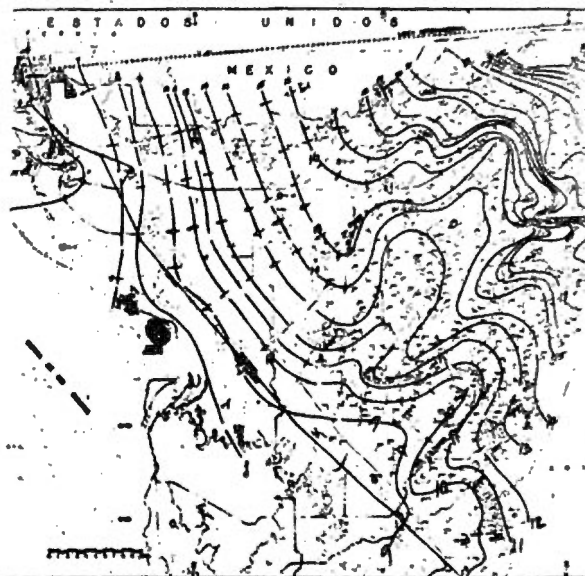


FIG. 2.6 CONFIGURACION DE NIVELES ESTATICOS DEL ACUIFERO SUPERIOR EN 1968.

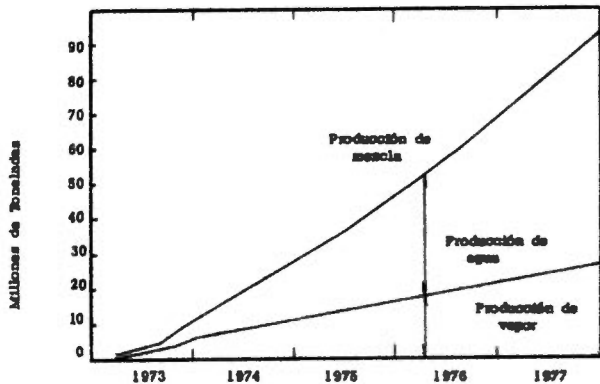


Fig. 2.6 PRODUCCION ACUMULADA DE VAPOR Y MEZCLA EN EL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO .

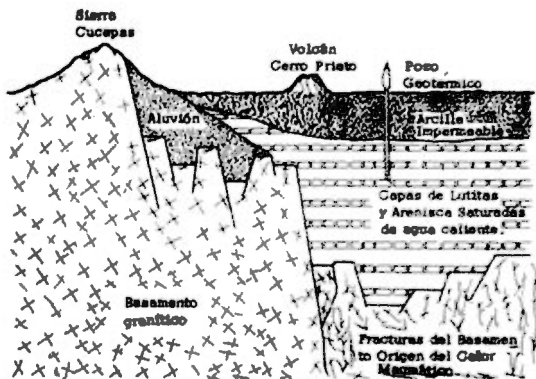


Fig. 2.2. ESQUEMA DE LA SECCION GEOLOGICA NE-SW.

3. BALANCE GEIHDROLOGICO

3.1 *Cálculo del Gasto Promedio*

El estudio geohidrológico del campo geotérmico de Cerro Prieto requiere de una idealización del conjunto de pozos y la de terminación de una extracción, equivalente al gasto total extraído. Por tal motivo es necesario la determinación de este gasto promedio con base en la información obtenida.

Entre los datos mencionados en el capítulo 2 se encuentra el de las extracciones mensuales totales en mezcla del conjunto de pozos; éstos datos vienen resumidos en la figura 2.6.

Una forma de obtener el gasto promedio es tomar la pendiente de la recta de la figura 2.6 (recta de extracciones) y multiplicarla por una densidad previamente seleccionada para un va

lor promedio de la temperatura existente en el acuífero.

Así resulta que, de la figura 3.6 la extracción promedio es -
 $q = 1.6 \times 10^6 \text{ ton/mes}$. Tomando una densidad promedio de ---
 $\rho = 2.836 \text{ ton/m}^3$, corresponde a una temperatura promedio en -
 el acuífero de 200 °C, el gasto promedio de extracción resul-
 ta ser:

$$Q = q \times K \text{ l/p}$$

donde

Q gasto promedio de extracción, en $\text{m}^3/\text{día}$
 extracción promedio de mezcla, en ton/mes
 densidad del fluido, en ton/m^3

sustituyendo valores

$$Q = 1.6 \times 10^6 \text{ ton/mes} \times 1/2.836 \text{ ton/m}^3$$

$$Q = 1.932 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes} = 63793 \text{ m}^3/\text{día}$$

3.1 Cálculo de las Características Geohidrológicas

La corteza terrestre, compuesta por un gran número de rocas -
 duras y no consolidadas, funciona como un vasto depósito de -
 almacenamiento y transmisibilidad de agua subterránea, estos-
 depósitos, para estudios geohidrológicos reciben el nombre de
 acuíferos, los cuales por su formación geológica se pueden di-

vidir en dos tipos:

1. Acuífero Freático, es aquel acuífero que tiene una superficie freática sujeta a la presión atmosférica y su nivel puede subir por las influencias de agua de lluvia por infiltración y pueda bajar por las extracciones.
2. Acuífero Artesiano, es aquel acuífero en el que el agua - esta encerrada por capas confinantes de material impermeable. En otras palabras, el agua almacenada está bajo presión.

Cabe señalar que, un acuífero freático que se encuentra sobre un estrato semipermeable que permite un movimiento lento de agua es conocido como acuífero freático semiconfinado, y un acuífero artesiano que se encuentra confinado al menos por un estrato semipermeable, es conocido como un acuífero artesiano semiconfinado.

Los parámetros más importantes en el estudio de un acuífero - desde el punto de vista geohidrológico son los coeficientes - de transmisibilidad, de almacenamiento y de permeabilidad ya que éstos caracterizan el flujo de agua a través del acuífero.

Se define al coeficiente de transmisibilidad como la cantidad

de agua en volumen que pase en un día a través de una franja vertical del acuífero de una unidad de ancho si el gradiente de presión es unitario. En otras palabras es la facilidad con la que se transmite el agua y es análoga a la conductividad térmica en la teoría del calor. Sus unidades más comunes son: $\text{long}^2/\text{tiempo}$.

Se define al coeficiente de almacenamiento como el volumen de agua liberada del almacenamiento del acuífero en una columna vertical de área transversal unitaria y cuando el nivel desciende en una unidad de longitud siendo además adimensional.

El coeficiente de permeabilidad también conocido como conductividad hidráulica, puede definirse como el volumen de agua por unidad de tiempo que pasa a través de una sección de área transversal unitaria y bajo un gradiente de presión también unitario.

Desde el punto de vista geológico el acuífero de Cerro Prieto es del tipo artesiano semiconfinado, es decir, un acuífero cubierto en su capa superior con un material semipermeable (material arcilloso) y que puede aportar volúmenes de agua al acuífero principal, en éste caso al acuífero geotérmico. Sin embargo el desconocimiento *A-Priori* de las características de la capa confinante (capa arcillosa) hace necesario el empleo de diferentes soluciones teóricas para el --

ósculo de las características geohidrológicas, desde la solución de Muskhelishvili para acuíferos semiconfinados hasta la solución de Theis para acuíferos artesianos. Esto se llevó a cabo y en el presente trabajo únicamente se soluciona la solución de Theis cuyos resultados se consideran más acordes con el problema físico.

3.2.1 Solución de Theis

Método de la curva tipo

El abatimiento en un acuífero del tipo artésiano se calcula con la expresión de Theis siguiente:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (3.1)$$

donde

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

- s abatimiento en un punto de observación cualquiera, en m
- Q gasto promedio de extracción, en m³/día
- T coeficiente de transmisibilidad, en m²/día
- S coeficiente de almacenamiento
- r distancia desde el pozo de bombeo hasta el punto de observación, en m.

t tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo, en días

La ecuación (3.1) puede describirse como:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (3.1)$$

donde $W(u)$ reemplaza la expresión integral y se la conoce como "la función de pozo de u ".

A simple vista, la ecuación (3.2) es un medio directo y simple para despejar T . Sin embargo T también está incluido en el término $W(u)$ por lo que no es posible una solución directa. Por ello es conveniente el uso de una curva tipo o solución gráfica.

En la ecuación (3.2) los únicos términos variables son el abatimiento s y la función pozo $W(u)$; en forma similar, en la ecuación para u los únicos términos variables son: u , s , y t . Esto se aclara si las ecuaciones antes mencionadas se escriben de la forma siguiente

$$W(u) = \left\{ \frac{4T}{Q} \right\} s \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{u} = \left\{ \frac{4T}{S} \right\} \frac{s}{t} \quad (3.4)$$

Los términos entre paréntesis son constantes, y el parecido que muestran las formas de las ecuaciones (3.3) y (3.4) podría sugerir que, pasando por alto los términos entre paréntesis, el término $W(u)$ varía con el término $1/u$ en la misma forma como variará s con z/a^2 . Esto es, si los valores de $W(u)$ se dibujan contra los valores correspondientes de $1/u$ la curva resultante sería semejante a aquella de los valores de s contra los valores de z/a^2 . Esto puede realizarse dado que existen tablas publicadas (ref. 7) que dan los valores de $W(u)$ y de u y de la realización de una prueba de bombeo pueden obtenerse los valores de s , b y λ .

Si éstas dos curvas se dibujan en papel milimétrico, ellas mostrarán una semejanza general de forma pero no tendrán curvaturas idénticas. Esto se debe al hecho de que las variables en las partes derechas de las ecuaciones (3.3) y (3.4) están multiplicadas por constantes diferentes.

Sin embargo si las dos curvas se dibujan en papel logarítmico, las multiplicaciones se transforman en sumas de tal manera que las diferencias entre los factores constantes de las ecuaciones (3.3) y (3.4) sólo ocasionan un desplazamiento relativo en las escalas horizontal y vertical de las dos curvas. Siguiendo estas ideas las ecuaciones (3.3) y (3.4) pueden reescribirse de la forma siguiente:

$$\log W(u) = \log \left(\frac{d\pi T}{Q} \right) + \log s$$

de la ec. (3.3)

$$\log 1/u = \log \left(\frac{4T}{s} \right) + \log L/a^2$$

de la ec. (3.4)

Preparando una curva logarítmica con los valores de $W(u)$ como ordenadas y los de $1/u$ como abscisas, se construye lo que se conoce como curva tipo para la ecuación de Thies. Esta curva tiene la misma forma general y tendencia que una curva en cuyas ordenadas se grafiquen valores de s y en las abscisas valores de L/a^2 (curva tiempo-abatimiento).

La solución por este método requiere la superposición de la curva tiempo-abatimiento sobre la curva tipo, manteniendo los ejes coordenados paralelos, de tal manera que se encuentre una buena concordancia entre los ejes correspondientes. Se elige entonces un punto de coincidencia en cualquier lugar de la curva para usarlo en el cálculo de los coeficientes de transmisibilidad y almacenamiento.

La elección arbitraria de este punto proporciona las coordenadas siguientes s , L/a^2 , $W(u)$ y $1/u$ las cuales sustituidas en las ecuaciones (3.3) y (3.4) siguientes, nos darán los valores de los coeficientes de transmisibilidad y alma-

censamiento.

$$T = \frac{Q}{4\pi b} u \quad (3.3)$$

de la ec. (3.3)

$$S = \frac{HT}{1/u} \frac{1}{u} \quad (3.4)$$

de la ec. (3.4)

Para la aplicación de la teoría de Theis al acuífero de Cerro Prieto, es necesario tomar en cuenta el efecto que, sobre los niveles de agua, tanto dentro como fuera del campo de explotación tienen los pozos de bombeo.

Una estimación de estos efectos puede obtenerse, con la idealización del inciso 3.1 en la cual se considera que el bombeo del campo de pozos está uniformemente distribuido sobre un área circular de radio " a " dentro del cual se localizan el conjunto de pozos en explotación.

El estudio de esta influencia se resume en una variante en la ecuación de abatimientos (ec. 3.5) y para acuíferos artesianos ó freáticos (ref. 8)

$$\text{para } z < z_0 \quad \text{y} \quad z > 0.4 \frac{a^2}{r^2}$$

$$4\pi r s = Q \left[W(u) + \left(\frac{1}{u} - \frac{1}{u_0} \right) \left(1 - \exp \left[-\frac{u_0^2}{u} \right] \right) - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \exp \left[-\frac{u_0^2}{u} \right] \right]$$

para $x \geq x_c$ y $x < 0.4 a^2/v$

$$d\pi/dt = 2 \{W(u) + (0.5 u_c) \exp \{-u\}\}$$

donde

$$u_c = a^2/4vt$$

$$u = x^2/4vt$$

$$v = T/S$$

Lo anterior indica que para la determinación de las características geohidrológicas se modifican los valores originales de la función $W(u)$ y por lo tanto la curva tipo de Theis.

Por su localización el pozo M-20 ha sido considerado en el centro del campo de explotación. Sus distancias a los dos pozos de observación M-15 y M-6 son de 600 y 2200 m. respectivamente.

Es necesario mencionar también que debido a su localización el pozo M-15 se ha considerado en la frontera del campo y que por lo tanto el pozo M-6 queda localizado fuera del mismo campo.

La corrección a los valores originales de la curva tipo de Theis se obtienen de la manera siguiente:

$$u_a = \frac{a^2 g}{4T^2}$$

$$u = \frac{a^2 g}{4T^2}$$

por lo que $\frac{u}{u_a} = \frac{\frac{a^2 g}{a^2 g} \cdot 4T^2}{\frac{a^2 g}{a^2 g} \cdot 4T^2} = \frac{a^2}{a^2}$

sustituyendo valores para el pozo de observación M-6, para el cual $a = 600$ m y $r = 2200$ m. resulta $\frac{u}{u_a} = \left(\frac{2200}{600}\right)^2 = 13.44$ por lo que

$$u_a = u/13.44$$

y para el pozo de observación M-10, para el cual $a = 600$ m. y $r = 600$ m. resulta $u/u_a = \left(\frac{600}{600}\right)^2 = 1.0$

por lo que

$$u_a = u$$

Los valores de u y de la función $W(u)$ se obtienen de la tabla 3.1 (ref. 7) con los cuales es posible calcular la corrección correspondiente.

Para el caso $r \geq a$ las correcciones para los dos pozos de observación M-6 y M-10 se presentan en las tablas 3.2 y 3.3

respectivamente con ellas es posible graficar (en papel logarítmico) la curva tipo (modificada) de Theis, ésta curva se presenta en la figura 3.1.

En las figuras 3.2.a y 3.2.b, graficadas en papel logarítmico se presentan las historias piezométricas de los pozos — M-6 y M-10 respectivamente.

Dada la falta de información al respecto, se ha supuesto — que el nivel freático está en la superficie del terreno.

De la superposición de la curva piezométrica para el pozo — M-10 con la curva tipo de Theis se obtuvieron los siguientes parámetros $s = 29.0$ m., $1/u = 4.8$, $t = 1.668$ días, $W(u) = 0.5$ los cuales al sustituirlos en las ecuaciones — (3.5) y (3.6) se obtiene $T = \frac{68.738}{49(29)} (0.5) = 126.8 \text{ m}^2/\text{día} = (0.001467 \text{ m}^2/\text{s})$. $S = \frac{4 \times 126.8 \times 1000}{4.8 \times (600)^2} = 0.29$.

De la misma manera los parámetros obtenidos para el pozo — M-6 son: $s = 29.0$ m., $1/u = 20$, $t = 1100$ días, $W(u) = 1.8$, que sustituidos en las ecuaciones (3.5) y (3.6) resultan — $T = \frac{68.738 \times 1.8}{49(20)} = 456.45 \text{ m}^2/\text{día} (0.0052 \text{ m}^2/\text{s})$. y $S = \frac{4 \times 1100 \times 456.45}{20 \times (2200)^2} = 0.02$.

3.3 Predicción de Abatimientos Futuros

Con los valores de las características geohidrológicas se calculan los probables abatimientos futuros en el pozo M-10. La extrapolación se llevó a cabo a partir de 400 días de inicio al bombeo, hasta un tiempo de 6000 días (16.4 años).

En la tabla (3.4) se muestra la tabulación realizada para un gasto de extracción igual al gasto promedio ($63,733 \text{ m}^3/\text{día}$). En la figura (3.5) se han graficado estos valores al igual que se ha extrapolado en forma gráfica abatimientos futuros para cuando se ha extraído un gasto igual a el doble del gasto promedio ($127,466 \text{ m}^3/\text{día}$) y, para cuando se considera un gasto de reinyección igual a 1.2 veces el gasto promedio de extracción ($76,479 \text{ m}^3/\text{día}$).

La extrapolación fue llevada a cabo por medio de superposición de causas y efectos y a partir de la curva obtenida con la extracción de $Q = 63.733 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se presenta las ecuaciones utilizadas y los cálculos realizados para la tabla (3.4).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

de la ec. (3.5)

Sustituyendo los valores constantes y el valor de T se obtiene:

$$k = \frac{63.783}{4 \times 5 \times 126.8} W(u)$$

$$S = 39.997 W(u) \quad (3.7)$$

$$1/u = \frac{476}{\Delta t}$$

de la ec. (3.6)

Sustituyendo los valores constantes y el valor de T se tiene:

$$1/u = \frac{4 \times 126.8}{.29 (600)^2} t$$

$$1/u = 0.00485 t \quad (3.8)$$

La tabulación se lleva a cabo sustituyendo los valores de t (tiempo en días) en la ecuación (3.8) (se obtiene el valor de $1/u$) y entrando con el valor de $1/u$ en la curva tipo de Theis (fig 3.1) se obtiene el valor del parámetro $W(u)$ correspondiente, al cual sustituido en la ecuación (3.7) proporciona el valor del abatimiento correspondiente.

3.4 *Plantamiento de un Modelo Matemático que represente el comportamiento del Acuífero a diferentes políticas de explotación*

La etapa más avanzada en el estudio de un acuífero consiste en el establecimiento de un modelo que reproduzca su comportamiento dinámico a las sollicitaciones a que se le somete. En otras palabras permite conocer la variación en sus condiciones piezométricas, producidas por un determinado régimen de explotación ó alimentación.

3.4.1 Ecuaciones del movimiento

La ecuación del movimiento transitorio en un acuífero está basada fundamentalmente en la ley de Darcy y el principio de la conservación de la masa. La ley de Darcy en forma diferencial se expresa:

$$v_x = -k_x \frac{\partial H}{\partial x} \quad (3.4)$$

donde

v_x velocidad, en dirección x

k_x permeabilidad del medio, en la dirección x

H carga o altura piezométrica en el punto considerado

El principio de conservación de la masa indica que el flujo neto de entrada a un volumen V , más una cierta masa genera-

de dentro del volumen por unidad de tiempo, es igual al incremento de masa, dentro del volumen, por unidad de tiempo.- Lo anterior se expresa por la siguiente ecuación:

$$-\int_V \vec{v} \cdot d\vec{a} + \int_V \rho F dV = \int_V S_A \frac{\partial M}{\partial t} dV \quad (3.10)$$

donde:

- ρ densidad del fluido
- $\vec{v}$ velocidad del fluido a través del elemento $d\vec{a}$ de la superficie que rodea el flujo (sentido positivo hacia afuera del elemento volumétrico)
- F volumen del fluido creado por unidad de volumen y por unidad de tiempo
- S_A almacenamiento específico
- t tiempo

La primera integral de (3.10) está llevada sobre toda la superficie que rodea al volumen considerado y representa la masa neta de fluido que entra por dicha superficie en la unidad de tiempo.

La segunda integral representa la masa "creada" dentro del volumen por unidad de tiempo.

La integral del miembro derecho de (3.10) representa el cambio de masa por unidad de tiempo dentro del volumen conside-

rado.

La expresión integral (3.10) puede aplicarse directamente a elementos de volumen finitos dentro de la región en estudio; la variación con el tiempo se debe tratar por incrementos finitos; por lo que en cada intervalo de tiempo se calculan valores medios del miembro izquierdo de (3.10).

3.4.2 Planteo del modelo

Considerando el flujo de agua dentro de un acuífero, como -- flujo laminar, los elementos finitos para el tratamiento de acuíferos pueden considerarse como celdas planas (en realidad columnas de altura variable como se indica en la fig -- 3.4), en las que el flujo considerado en la primera integral de (3.10) tiene lugar a través del perímetro que limita a la celda.

En la realidad existen flujos normales a la superficie considerada, tales como extracciones por bombeo, infiltraciones a lo largo de ríos y canales, alimentaciones de otros acuíferos etc.; este tipo de flujos constituyen las influencias externas al acuífero cuyos efectos se tratan de evaluar por medio del modelo; para tomarlos en cuenta se introduce la segunda integral de la ecuación (3.10), y los flujos normales a la superficie plana del elemento se consideran "generados" dentro del elemento.

Así pues, al suponer constante la masa específica del agua, - la expresión (3.10) se transforma en:

$$-\oint \frac{\partial \psi}{\partial n} \cdot d\vec{p} + \iint_A b F \, dA = \iint_A S \frac{\partial H}{\partial t} \, dA \quad (3.11)$$

donde

- p perímetro, en m
 S coeficiente de almacenamiento
 b espesor del flujo en m

La integral de superficie se ha transformado en una integral de línea, y las integrales de volumen se transforman en integrales de superficie.

Una forma conveniente de efectuar el cálculo numérico de los términos de la ecuación (3.11), es la de escoger los elementos finitos como polígonos de influencia de puntos adecuadamente localizados en la zona en estudio. Se supone en este esquema que cada elemento tiene características representativas del área que cubre. Además se tiene la ventaja de formar un arreglo asimétrico e irregular que permite disminuir la amplitud de la malla donde sea necesario, como en zonas de fuerte extracción, de fuerte gradiente, etc.

Para el desarrollo de este esquema se procede inicialmente a cubrir la zona en estudio con una malla de triángulos aproximados

madamente equiláteros y de tamaño variable según el detalle que se desee obtener en la configuración.

A continuación se traza el polígono de influencia de cada uno, definiendo sus vértices por las intersecciones de las mediatrices de los triángulos que tienen como vértice común al nudo considerado.

Al utilizar este esquema, la primera integral de (3.11) se convierte en una suma de caudales de la forma:

$$\delta \bar{V} \cdot \Delta \bar{p} = \delta \sum_A \frac{\partial H}{\partial A} \cdot \Delta \bar{p} = \sum_A \frac{\partial H}{\partial A} \Delta \bar{p}$$

Ya que el gradiente hidráulico es normal al segmento de perímetro $\Delta \bar{p}$ de la celda. El gradiente se calcula como el co-eficiente de la diferencia de niveles piezométricos en dos elementos contiguos entre la longitud del segmento que une sus centros; en un intervalo de tiempo, el gradiente se toma como el promedio de sus valores al inicio y al final del mismo intervalo. El coeficiente de transmisibilidad se calcula como el promedio de los valores representativos de las dos celdas.

De acuerdo con lo anterior, el primer término de (3.11) se puede escribir

$$- \oint \bar{b} \bar{v} \cdot d\bar{p} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \gamma_{L0} H_{L,k+1} - H_{0,k+1} +$$

$$+ H_{L,k} - H_{0,k} \quad (3.12)$$

en la que

$$\gamma_{L0} = \frac{2 \tau_L \tau_0}{\tau_L + \tau_0} \frac{S_{L0}}{L_{L0}}$$

τ_0 transmisibilidad del elemento 0

τ_L transmisibilidad del elemento L

$\overline{L0}$ segmento $\overline{L0}$

L_{L0} longitud del segmento $\overline{L0}$

S_{L0} longitud del lado del polígono normal al segmento $\overline{L0}$ --
(ancho de flujo)

$H_{L,k}$ altura piezométrica del nudo L en el instante k

n número de elementos adyacentes al elemento 0

El segundo término de la ecuación, que toma en cuenta los ---
flujos normales a la superficie considerada, se sustituirá ---
por un caudal $Q_{0,k}$ (caudal neto medio, normal al elemento 0 , -
en el intervalo de tiempo k), valorado en cada elemento de ---
acuerdo con las extracciones por bombeo, aportación por in---
filtración vertical, etc.

Finalmente, el miembro de la derecha de (3.14) que represen---
ta la variación del almacenamiento dentro del volumen conside---

rado, por unidad de tiempo, se valorará como:

$$\frac{A_o S_o}{\Delta t} \quad H_{o,k+1} - H_{o,k} \quad (3.13)$$

en la que

- A_o área del elemento o
 S_o coeficiente de almacenamiento del elemento o
 Δt intervalo de tiempo

Sustituyendo en (3.11) las expresiones (3.12) y (3.13) se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} \sum_i \left[y_{L,i} H_{L,i+1} - H_{o,i+1} + H_{L,i} - H_{o,i} \right] + \\ + Q_{o,i} + \frac{A_o S_o}{\Delta t} [H_{o,i+1} - \\ - H_{o,i}] \end{aligned} \quad (3.14)$$

con todos los términos definidos anteriormente.

Aplicando la expresión (3.14) a todos los elementos del área en estudio, se obtiene un sistema de ecuaciones lineales donde las incógnitas son las alturas piezométricas en el instante $t + 1$, supuestas conocidas las características del acuífero, los caudales de extracción y la distribución de alturas-

piezométricas en el instante t .

3.4.3 Programa para computadora digital (ref 9).

El programa elaborado para ejecutar el planteo y solución del sistema de ecuaciones en una computadora digital, consta principalmente de dos secuelas de cálculo: en la primera de ellas se define la geometría del modelo y en la segunda se plantea y resuelve el sistema de ecuaciones.

3.4.3.1 Definición de la geometría del modelo

Para cada nudo se ejecuta la secuela siguiente:

- a) Cálculo de las coordenadas de los vértices del polígono de influencia, definidos por las intersecciones de las mediatrices de los triángulos que tienen por vértice común al nudo considerado.
- b) Cálculo del área del polígono de influencia en función de las coordenadas de sus vértices.

Las áreas de los polígonos se van acumulando conforme se calculan, obteniendo al final el área total de la zona estudiada. Se proporciona a la computadora una secuela de cálculo para obtener el área total en función de las coordenadas de los nudos que definen el perímetro, con objeto de verificar-

la calculada por acumulación de áreas parciales.

3.4.3.2 Planteo y solución del sistema de ecuaciones

Inicialmente se calcula para cada nudo o elemento:

- a) Caudal de flujo a través de cada lado del polígono de influencia. El caudal se efectúa utilizando la expresión

$$v_{L0} = \frac{\frac{1}{2} \gamma_L \gamma_S}{\gamma_L + \gamma_S} \frac{S_{L0}}{L_{L0}}$$

- b) Volumen de almacenaje del elemento poligonal correspondiente utilizando la expresión $A_{\text{Almacenaje}} = A_p \cdot S_p$

A continuación se procede al planteo y solución del sistema de ecuaciones para el primer intervalo de tiempo, aplicando la expresión (3.14) a cada elemento.

Como primera aproximación a la solución del sistema, se calculan las cargas perturbadoras al final del intervalo $N_{0,k+1}$ utilizando la siguiente expresión:

$$N_{0,k+1} = \frac{\Delta t}{A_0 S_0} \left[-Q_{0,k} + \sum_1^N \gamma_{L0} (N_{L,k} - N_{0,k}) \right] + N_{0,k}$$

en la que $W_{0,k}$ es la carga piezométrica inicial.

Con esta primera aproximación, se aplica un método iterativo (Gauss-Seidel por ejemplo), con el número de iteraciones necesarias para que la solución quede dentro de una tolerancia fijada.

Finalmente se imprimen los valores calculados de las cargas piezométricas en los nudos, las cuales constituyen los valores iniciales para la solución del sistema correspondiente - al siguiente intervalo de tiempo.

El diagrama de bloque que representa esquemáticamente las secuencias de cálculo descritas, se presenta en la fig (3.5)

3.4.4 Aplicación al acuífero de Cerro Prieto

3.4.4.1 Geometría

Se construyó una malla cuya forma consiste en una porción -- (tajada) de un círculo con centro en el pozo M-20 y radio -- igual a 57 km. (fig 3.6). En dicha porción se establecieron 50 elementos a los cuales se les determinó el área, gasto -- equivalente de extracción, ancho de flector, longitud de centro a centro de los nudos, transmisibilidad y almacenamiento (supuestos).

3.4.4.2 Condiciones piezométricas iniciales

Para la calibración del modelo se adoptó como condición piezométrica inicial la configuración de los niveles estáticos reportada por los pozos de observación M-10 y M-6 durante el periodo 1973-1977 (figs. 3.2.a y 3.2.b).

3.4.4.3 Extracciones

Los volúmenes de extracción para cada nodo se determinó con base al caudal promedio mensual de extracción y se hizo la consideración de que los nodos con caudal de extracción son exclusivamente aquellos nodos localizados dentro del campo de explotación (idealizado en los incisos 3.1 y 3.3) y el valor de su caudal se determinó dependiendo de su área de influencia.

3.4.4.4 Características hidrodinámicas

Bajo la hipótesis de que el acuífero se comporta como uno del tipo artesiano confinado, se dio a las características geohidrológicas (para los nodos dentro y fuera del campo) los valores iniciales siguientes $S = 0.19$ y $T = 0.0015 \text{ m}^2/\text{s}$ para los nodos localizados dentro del campo y $S = 0.04$ y $T = 0.0035 \text{ m}^2/\text{s}$ para los localizados fuera del campo de explotación.

3.4.4.5 Comparación de resultados y calibración

Los resultados obtenidos con los valores supuesto de T y S difirieron en mucho de los datos conocidos (historia piezométrica en los pozos M-10 y M-6) por lo que se procedió a la calibración, esto es a variar en forma más o menos arbitraria las características geohidrológicas supuestas inicialmente de manera que la evolución obtenida se fuera ajustando a las evoluciones existentes en el M-10 y M-6 (historia piezométrica observada).

Después de varios ensayos se obtuvo una evolución bastante aceptable para el pozo M-10 (localizado en la frontera del campo), como puede verse en la figura (3.7) y fueron obtenidos con los valores de $S = 0.937$ y $T = 0.0045 \text{ m}^2/\text{s}$ para los nudos localizados dentro del campo y $S = 0.01$ y $T = 0.0065 \text{ m}^2/\text{s}$ para los nudos restantes.

Se puede observar en los valores anteriores, una semejanza con los obtenidos en el análisis teórico, lo que demuestra condiciones aceptables en el modelo.

Se presenta en la tabla (3.5) un resumen de los resultados obtenidos con el modelo y su comparación con las evoluciones observadas. La figura (3.7) muestra esto mismo en forma gráfica.

Una vez que se tiene el modelo calibrado en forma aceptable es posible predecir en forma rápida el comportamiento del -- acuffaro bajo políticas diferentes de explotación.

TABLA 3.1 VALORES DE LA FUNCION $W(u = \pi/5)$

[illegible]

* PARA AGUENTES DEPENDIENDO $\gamma/\delta = 0,0$

$W(u)$	u	$1/u$	u_n	$0.5 u_n e^{-u_n}$	$W(u) + C$
	10	0.1	0.744	0.0000168	
0.0011	5	0.2	0.372	0.00325	0.00235
0.0480	2	0.5	0.1488	0.0100	0.0589
0.2194	1.6	1.0	0.0744	0.01368	0.233
0.5598	0.8	2.0	0.0372	0.01128	0.57108
1.2229	0.3	5.0	0.0149	0.00605	1.22975
1.8229	0.1	10.0	0.00744	0.00334	1.82624
2.4679	0.05	20.0	0.00372	0.00177	2.46967
3.3547	0.02	50.0	0.00148	0.000725	3.35542

Tabla 3.2 corrección a los valores de la curva tipo de Davis para el caso-
 2) para el peso M-6.

$W(u)$	u	$1/u$	u s	$0.5 u \frac{G}{s} - \frac{1}{2}$	$W(u) + G$
	10	0.1	10	0.000125	
0.0011	5	0.2	5	0.01634	0.01794
0.0439	2	0.5	2	0.135335	0.184225
0.2124	1.0	1.0	1.0	0.16203	0.40333
0.3590	0.5	2.0	0.5	0.15243	0.71143
1.2217	0.20	5.0	0.20	0.08167	1.30457
1.8220	0.10	10.0	0.10	0.04534	1.86814
2.4679	0.05	20.0	0.05	0.0227	2.4916
3.3347	0.02	50.0	0.02	0.0090	3.3945

Tabla 3.3 corrección a los valores de la curva tipo de Thoms para el caso $r = 2$, a para el peso M-10.

(días) t	(m³/día) t	L/s	W (u)	s (m)	s (bars)
400	1.005	1.54	0.55	22.0	2.13
800	2.102	3.08	1.07	43.70	4.14
1 200	3.20	4.62	1.300	55.19	5.34
1 600	4.11	7.375	1.55	63.10	6.11
2 000	5.40	9.70	1.80	72.00	6.80
2 500	6.33	13.135	2.04	82.40	7.90
3 000	8.33	14.63	2.20	90.00	8.61
4 000	10.92	18.40	2.40	99.30	9.60
5 000	13.70	24.25	2.70	100.0	10.45
6 000	16.43	29.10	2.80	115.30	11.15

Tabulación para $Q = 63.722 \text{ m}^3/\text{día}$

Tabla (3.4)

Tiempo (años)	Valores de T y S	POZO		M - 10		Valores de T y S	POZO		M - 6	
		Abeti- miento (m)	Abeti- miento (m)	Diferencia (m)	Error %		Abeti- miento (m)	Abeti- miento (m)	Diferencia (m)	Error %
	T=0045					T=0045				
1.2	S=.337	10.0	20.4	10.4	57.7	S=.01	10	11.4	6.6	26.6
	T=0045					T=0045				
1.5	S=.337	30.0	36.5	6.5	21.6	S=.01	19.0	16.0	3.0	19.2
	T=0045					T=0045				
2.0	S=.337	37.9	42.0	4.1	10.7	S=.01	23.1	20.1	3.1	13.36
	T=0045					T=0045				
2.5	S=.337	43.4	46.1	2.7	6.2	S=.01	27.0	23.0	4.0	14.0
	T=0045					T=0045				
3.0	S=.337	51.0	49.0	2.0	3.0	S=.01	27.2	25.0	2.2	8.0
	T=0045					T=0045				
3.5	S=.337	60.0	52.8	7.2	12	S=.01	28.6	27.0	1.6	6.6
	T=0045					T=0045				
4.0	S=.337	61.8	54.8	7.0	12.5	S=.01	31.8	28.7	3.1	9.7

Tabla (3.3) Comparación de Resultados.

* Medido

** Calculado

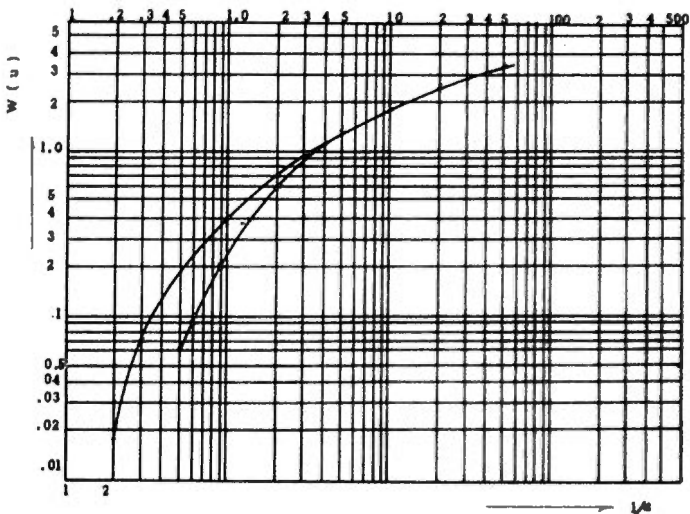


Fig. 3.1 CURVA TIPO DE THEIS MODIFICADA

Fig. 3.2. a HISTORIA PIEZOMETRICA DEL POZO M-6

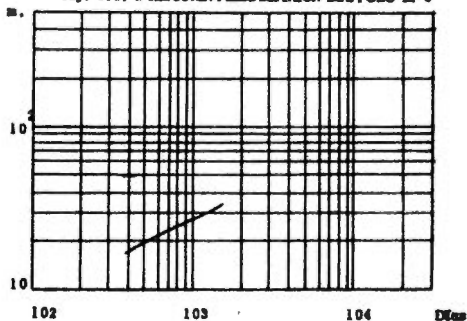
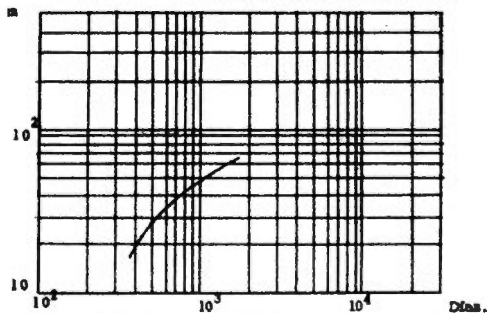


Fig. 3.2.b. HISTORIA PIEZOMETRICA DEL POZO M-16



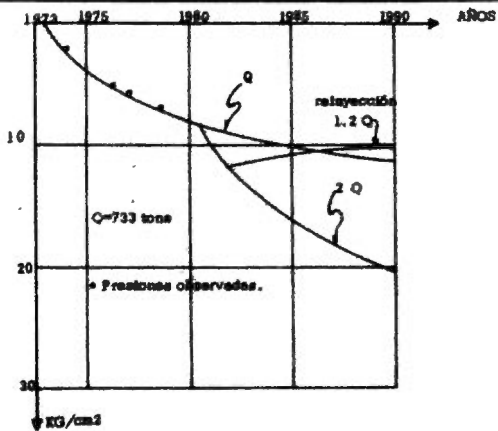


Fig. (3.3) PRESIONES PREDECIDAS Y OBSERVADAS EN LA FRONTERA DEL CAMPO DE POROS.

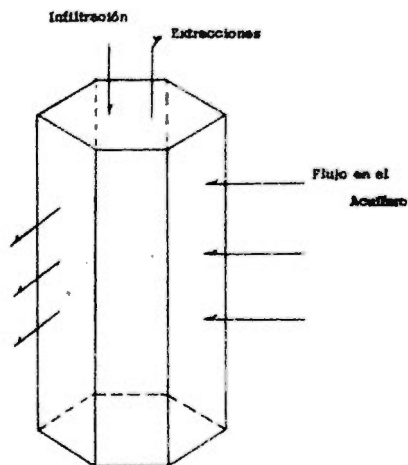


Fig. 3-4 ESQUEMA DE UN ELEMENTO VOLUMETRICO

Lectura de Datos:
 Planos de la geometría del modelo y
 Definición de características hidro-
 morfológicas.

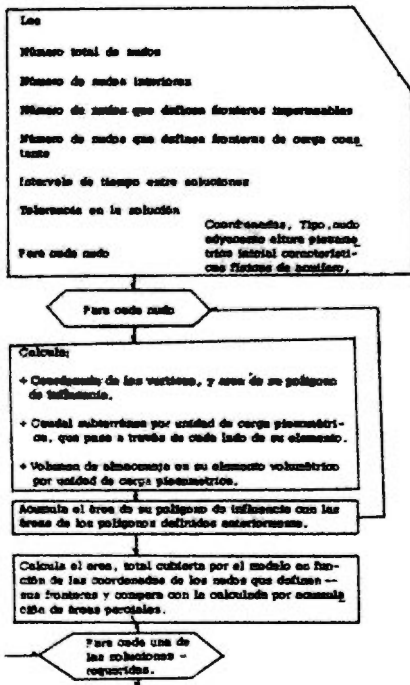
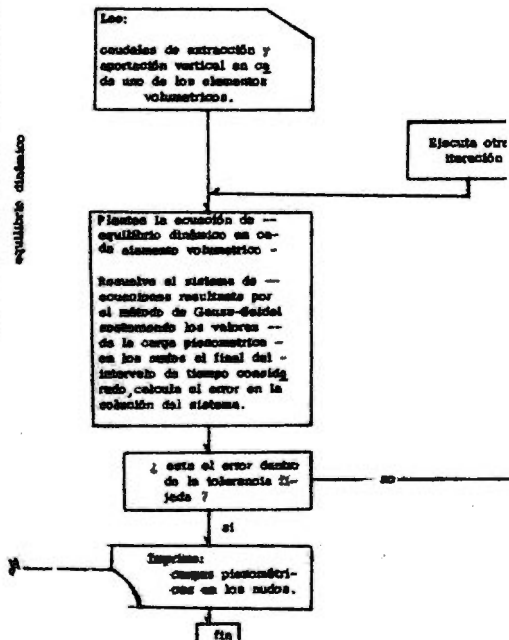


Fig. (3.3) DIAGRAMA DE FLUJOS PARA UN MODELO MATEMÁTICO DE ACUÍFEROS

Planteo y solución del sistema de ecuaciones de
equilibrio dinámico



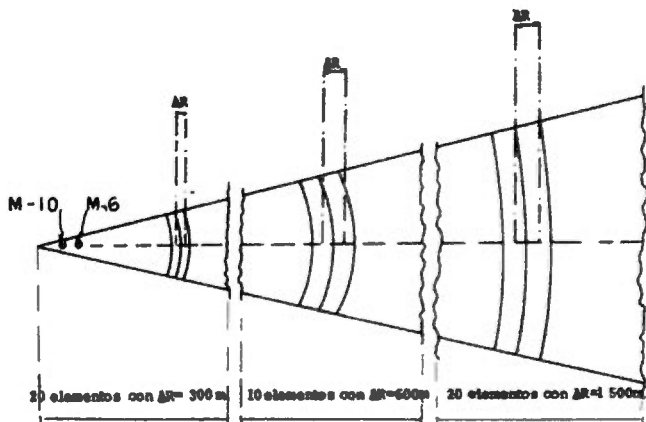
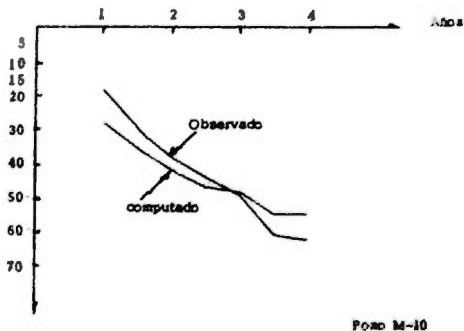
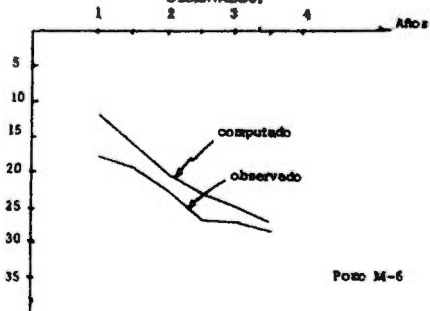


Fig. 3.6 GEOMETRIA DE LA MALLA CONSTRUIDA PARA CENRO PRIETO.



a (abatimiento)

Fig. 3.7 COMPARACION DE RESULTADOS CALCULADOS Y OBSERVADOS.



s (abatimiento)

4. BALANCE TERMICO

4.1 Consideraciones Generales

El comportamiento probable del depósito geotérmico de Cerro Prieto puede predecirse con base en sus características termodinámicas y en este trabajo, tomando en cuenta las consideraciones siguientes:

- Se idealiza el depósito geotérmico como un disco de diámetro $D = 3600$ mts y una profundidad igual a 2000 mts. con una fuente de calor en la parte inferior como se muestra en la figura 4.1.

Es de notarse que, el diámetro del disco es mayor que el utilizado en la idealización hecha para el balance geotérmico (cuyo diámetro es de 1200 mts). Esto se debe al hecho de

que la superficie (limitada por las isotermas) con contenido de calor es mayor que la superficie ocupada por los pozos.

Las curvas de igual temperatura (isotermas) se construyeron utilizando la información disponible como son los registros de temperatura en el fondo de los pozos, estas curvas se presentan en la figura 4.2.

Se supone al depósito limitado lateralmente por la isoterma de 200°C y por los límites geológicos superior e inferior — descritos en el capítulo 2.

Los valores de la conductividad térmica y de la capacidad calorífica utilizadas en este capítulo fueron obtenidos de las tablas publicadas (ref 1) y son los siguientes

Conductividad térmica para el acuífero

$$K = 0.005 \text{ cal/s cm } ^\circ\text{C} \{2.1 \times 10^{-3} \text{ KJ/s m } ^\circ\text{C}\}$$

Capacidad calorífica para la arenisca y lutita

$$C = 0.80 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} \{0.37 \times 10^{-1} \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}\}$$

Capacidad calorífica para el agua

$$C = 1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} \{4.18 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}\}$$

El gradiente geotérmico promedio se obtuvo de los registros

de temperatura en el fondo de los pozos y resultó ser -----
 $\Delta T / \Delta z = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C/m}$.

De acuerdo con el valor del coeficiente de almacenamiento el valor utilizado para la porosidad es $\phi = 0.12$

4.1 Determinación de Flujos de Calor

Para este cálculo se utiliza la ecuación del calor (ref 2) -
 siguiente

$$q = K \frac{dT}{dz} A$$

Donde

q Flujo de calor, en cal/seg (KJ/s = KW)

K conductividad térmica, en cal/s cm $^\circ\text{C}$ (KJ/s m $^\circ\text{C}$)

$\frac{dT}{dz}$ gradiente geotérmico, en $^\circ\text{C/m}$

A área, en m^2

4.2.1 Flujo Lateral

De la figura 4.1 el área lateral es

$$\begin{aligned} A_l &= \pi B L = 3.14 \times 3 \times 10^5 \times 2 \times 10^5 = \\ &= 12.56 \times 10^{10} \text{ cm}^2 \quad [1.26 \times 10^7 \text{ m}^2] \end{aligned}$$

Sustituyendo valores en la ecuación del calor el flujo lateral es:

$$\begin{aligned} q_L &= 0.005 \times 14.55 \times 10^{10} \times 0.1/100 = \\ &= 9.43 \times 10^5 \text{ cal/s } (3.46 \times 10^3 \text{ KW}) \end{aligned}$$

4.2.2 Flujo Vertical (ascendente)

De la figura 4.1 el área vertical es:

$$\begin{aligned} A_V &= \pi R^2/4 = 3.14 (5 \times 10^3)^2/4 = \\ &= 7.86 \times 10^{10} \text{ cm}^2 (7.86 \times 10^6 \text{ m}^2) \end{aligned}$$

Sustituyendo valores en la ecuación del calor, el flujo vertical es:

$$\begin{aligned} q_V &= 0.005 \times 7.86 \times 10^{10} \times 0.1/100 = \\ &= 3.53 \times 10^5 \text{ cal/s } (3.48 \times 10^3 \text{ KW}) \end{aligned}$$

Por lo tanto el flujo total es:

$$\begin{aligned} q_T &= q_L + q_V = 9.43 \times 10^5 + 3.53 \times 10^5 = \\ &= 12.96 \times 10^5 \text{ cal/s } (5.44 \times 10^3 \text{ KW}) \end{aligned}$$

4.3 Determinación del Contenido de Calor

El calor contenido en un depósito geotérmico se compone de -
dos partes, la primera proviene del calor que contiene la sa
sa rocosa y la segunda del calor que va aportando la masa de
fluido.

Para este cálculo se utiliza la ecuación del calor modifica-
da en la forma siguiente

$$Q^o = C M_g \Delta T$$

donde

Q^o contenido de calor, en cal (KJ)

M_g masa en consideración, en gr (Kg)

ΔT temperatura inicial-temperatura final, en °C

C capacidad calorífica, en cal/gr °C (KJ/Kg °C)

Para la determinación del valor de ΔT se requiere de las si-
guientes consideraciones.

La temperatura inicial de referencia que teóricamente debe-
ría de ser aquella temperatura para la cual se considera al-
depósito en equilibrio térmico, puede obtenerse de la tempe-
ratura promedio existente en el fondo de los poros bajo la -
hipótesis de que ésta temperatura y la de equilibrio del de-

pórito, es despreciable. Así, se tiene que, la temperatura-promedio en el fondo de los pozos y considerada como inicial es $T_L = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$

Dado que $\Delta T = T_L - T_f$, es necesario ahora tener una temperatura final de referencia, la cual puede determinarse con base en, la temperatura mínima de operación de la planta. Para esto se supusieron 4 temperaturas finales, teniéndose con esto 4 diferentes contenidos de calor.

4.3.1 Calor contenido en la Masa Rocosa

$$Q_R^* = M_R C_R \Delta T$$

$$M_R = V_R \rho_R$$

donde

V_R volumen de la masa rocosa, en cm^3 (m^3)

ρ_R densidad de la roca, en gr/cm^3 (Kg/m^3)

Dado que la porosidad es $\phi = 0.29$, el volumen de roca es ---

$V_R = (1 - \phi) V_X$ donde V_X es el volumen total

$$V_X = \frac{\pi D^2}{4} \times L = \frac{3.14 (3 \times 10^3)^2}{4} \times 2 \times 10^3 =$$

$$= 1.47 \times 10^{10} \text{ cm}^3 (1.47 \times 10^{10} \text{ m}^3)$$

Por lo tanto el volumen de roca es:

$$V_R = (1 - 0.22) \times 1.41 \times 10^{16} \text{ m}^3 \\ = 1.09 \times 10^{16} \text{ cm}^3 \quad (1.09 \times 10^{10} \text{ m}^3)$$

Siendo la masa rocosa de constitución granítica, su densidad es $\rho = 2.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2.5 \text{ g/cm}^3$ (2500 Kg/m^3) . Por lo tanto la masa de roca resuelta será: $M_R = 1.09 \times 10^{16} \times 2.5 = 2.7 \times 10^{16} \text{ g}$ $(2.7 \times 10^{13} \text{ Kg})$.

Sustituyendo valores en la ecuación del calor se tiene

$$Q_R = 0.22 \times 2.7 \times 10^{16} \Delta T = 5.9 \times 10^{15} \Delta T \text{ cal/}^\circ\text{C} \quad (2.47 \times 10^{13} \Delta T \text{ KJ/}^\circ\text{C})$$

Los resultados para diferentes ΔT se presentan en la tabla 4.1.

4.3.2 Calor contenido en el agua

Se utiliza la misma ecuación que para la roca, para este caso $C = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ $(4.18 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C})$. El volumen de la masa de agua es $V_A = \phi V_R$

$$V_d = 0.19 \times 1.41 \times 10^{16} = 4.08 \times 10^{15} \text{ cm}^3 (4.08 \times 10^9 \text{ m}^3)$$

De acuerdo con la densidad promedio del fluido escogido en el capítulo 3 la masa de fluido es:

$$M_d = 4.08 \times 10^{15} \times 0.856 = 3.41 \times 10^{15} \text{ ga} (3.41 \times 10^{12} \text{ Kg})$$

Sustituyendo valores en la ecuación modificada del calor:

$$Q_d = 1 \times 3.41 \times 10^{15} \times \Delta T = 3.41 \times 10^{15} \Delta T \text{ cal/}^\circ\text{C} (1.42 \times 10^{13} \Delta T \text{ KJ/}^\circ\text{C})$$

Los resultados para diferentes ΔT se presentan en la tabla 4.1.

Como dato adicional se determina el tiempo requerido por el depósito geotérmico para alcanzar el equilibrio térmico, suponiendo que este equilibrio ya ha sido alcanzado. Esto se calcula dividiendo el contenido total de calor entre el flujo total en el depósito. Los resultados para diferentes ΔT se presentan en la tabla 4.1.

4.4 Balance Térmico

La operación de la planta dio inicio en el año de 1973 con una extracción promedio mensual (en mercha) de 1.4×10^6 ton/mes por lo que el calor extraído en un año de operaciones:

$$Q_{\text{ext}}^s = 1.92 \times 10^{13} \text{ ga/año} \times 1 \times \Delta T$$

$$Q_{\text{ext}}^s = 1.92 \times 10^{13} \Delta T \text{ cal/año } ^\circ\text{C} (8.02 \times$$

$$\times 10^{10} \Delta T \text{ KJ/año } ^\circ\text{C})$$

Analizando un periodo de 6 años, el calor extraído para diferentes ΔT se presenta en la tabla 4.1.

T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	ΔT (°C)	Q _R		Q _S		Tiempo requerido para el equilibrio (años)	Q _{Ext}	
			(Cal)	(KJ)	(Cal)	(KJ)		(Cal/año)	(KJ/año)
300	200	100	5.00x10 ¹⁷	2.09x10 ¹⁵	3.41x10 ¹⁷	1.43x10 ¹⁵	20.600	1.92x10 ¹⁵	8.02x10 ¹²
300	150	150	7.66x10 ¹⁷	3.13x10 ¹⁵	5.11x10 ¹⁷	2.13x10 ¹⁵	30.800	2.68x10 ¹⁵	12.03x10 ¹²
300	100	200	1.00x10 ¹⁸	4.18x10 ¹⁵	6.82x10 ¹⁷	2.84x10 ¹⁵	41.100	3.84x10 ¹⁵	16.04x10 ¹²
300	80	220	1.10x10 ¹⁸	4.58x10 ¹⁵	7.50x10 ¹⁷	3.12x10 ¹⁵	45.200	4.22x10 ¹⁵	17.64x10 ¹²

TABLA 4.1 RESUMEN DEL BALANCE TERMICO.

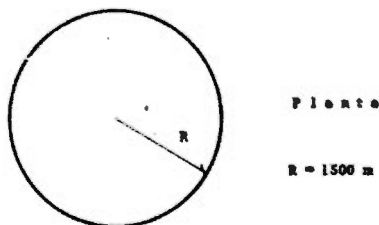
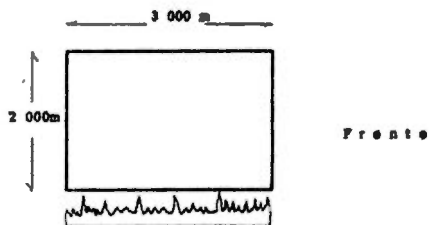


Fig. 4.1 IDEALIZACION DEL DEPOSITO GEOTERMICO

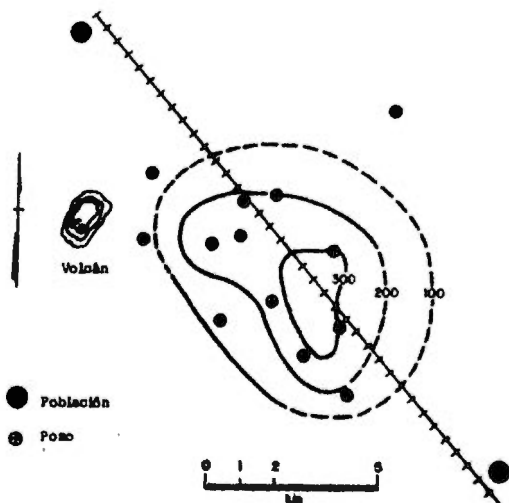


FIG. 4.2 CURVAS DE IGUAL TEMPERATURA (ISOTERMAS) ° C.

5. CONCLUSIONES

El valor del coeficiente de almacenamiento obtenido para el pozo M-10 (zona en explotación) es bastante alto para un acuífero del tipo confinado. Esto lleva a pensar que a pesar del hecho de que el depósito es del tipo agua dominante, el flasho o cambio de fase ocurre en la formación del acuífero en vez de que ocurra en los pozos.

Con referencia a la figura (3.3), la reducción de la presión en el fondo del pozo M-10 tendrá consecuencias de mucha importancia. Sin un incremento mayor en la producción, la "caída" de presión en los próximos diez años es de esperarse que sea del orden de 3 Kg/cm^2 . La planta generadora requiere una carga de presión en el caberal de aproximadamente 6.5 Kg/cm^2 y, haciendo cálculos del flujo agua-vapor a lo largo de los pozos (refs 10 y 11) se obtiene que si desciende la -

presión del orden de 3 Kg/cm^2 en el fondo, la producción de masa disminuirá en 20% aproximadamente. Esto afectará el -- gasto de flujo vapor que se requiere. Lo anterior implica -- incrementar la producción poniendo a producir tres o más pozos productores. Por otro lado un incremento mayor en la -- producción tal como doblar la producción de vapor, condenci- -- ría a tener una "caída" de presión de aproximadamente 12 Kg/cm^2 en los próximos diez años. Esta situación haría que algunos de los pozos no pudieran ser utilizados con el equipo -- instalado. Sin embargo esta situación se podría evitar a -- través de la reinyección del agua que se desecha actualmente a una laguna, de evaporación. Tomando en consideración la -- disminución de volumen por la disminución de temperatura en el proceso, se reinyectaría del orden del 60% del volumen ex- -- traído. Con esto prácticamente el acuífero recobraría la -- presión, aún sobre los niveles predichos por se incrementar la extracción. Esta situación puede verse en la fig (3.3).

El análisis presentado anteriormente muestra que la princi- -- pal (si es que hay otras) dificultad en utilizar más ampli- -- mente la energía geotérmica de Cerro Prieto, estriba en la -- disponibilidad de agua (Geohidrología) ya que el calor alma- -- cenado en el depósito es tan grande que aún en el caso de -- que en el país no existieran otros lugares con las caracte- -- rísticas térmicas del campo de Cerro Prieto, éste sería sufi- -- ciente para alimentar a plantas aún mayores que la instalada

en Cerro Prieto. En otras palabras el calor extraído en el campo de Cerro Prieto sólo representa un pequeño porcentaje del calor almacenado (véase la tabla 5.1) y es el factor geológico como elemento conductor del calor el que puede limitar la instalación de un equipo de mayor capacidad para la producción de energía, ya que la recarga hidráulica al acuífero es prácticamente nula, el agua proviene principalmente de los intersticios del acuífero y solo una pequeña parte proviene del estrato confinante de arcilla.

Cabe señalar también que en el caso de una mayor producción se tendría además de la caída de presión ya mencionada, un posible hundimiento a medida que una mayor cantidad de agua saiga del estrato confinante de arcilla.

ST	Q°_{ext} (cal) (A)	Q°_{tot} (cal) (B)	%(A/B)
100	1.15×10^{16}	8.41×10^{17}	1.37
150	1.71×10^{16}	1.26×10^{18}	1.37
200	2.30×10^{16}	1.69×10^{18}	1.37
320	2.83×10^{16}	2.05×10^{18}	1.37

TABLA 4.1 COMPARACION ENTRE EL CALOR EXTRAIDO Y EL CALOR
 ALMACENADO

R E F E R E N C I A S

1. W. Edward, Geothermal Energy utilisation
J Wiley & Sons (1977)
2. Goguel Jean, Geothermics, Mc Graw Hill-Book (1976)
3. I I E , Boletín Vol. 2 Núm. 11 (Nov. 1978)
4. Mercado Sergio, Migración de Fluidos Geotérmicos y Distribución
de Temperaturas en el Subsuelo del campo.
Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México. C.F.E.
5. Bolivia Enrique, Evaluación del Potencial Geotérmico de Cerro -
Prieto, Baja California, México (1976) C.F.E.
- 6.- C.E.C. Apuntes de Agua Subterráneas.
7. De Wiest R, Geohidology, J Wiley & Sons, Inc. (1965)
8. E. M. Hantush, Hidraulics of Wells.
9. Cruickshank C . y Chávez G., Modelo Matemático "DAS" para
el Estudio del Comportamiento de Acuíferos. Revista. Ingeniería
Hidráulica en México Vol. XXII (1969) Núm. 1
10. Cruickshank C. y Beresowsky M. Geohydrological and heat Ba-
lance in Cerro Prieto II (1979).

11. Baranowsky M. , Análisis del Flujo en Pozos Geotérmicos II (1980).
12. U.S.E.R., Study of The Geothermal Reservoir Underlying the — East Mesa Area, Imperial Valley, California (1976).
13. Organo Informativo del Sector Eléctrico C.F.E. (Mayo 1979).