

T  
525.2  
J 65a  
1969  
F. Ing. 1009  
Cj. 1

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

# “APLICACION DE SISTEMAS DE INVESTIGACION EN FUENTES GEOTERMALES EN EL SALVADOR”

PROYECTO DE INGENIERIA PRESENTADO POR:

VICTOR MANUEL IRAHETA G.

PREVIO A LA OPCION DEL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

SAN SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 1969.





U N I V E R S I D A D D E E L S A L V A D O R

RECTOR

Dr. José María Méndez

SECRETARIO

Dr. José Ricardo Martínez

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO

Ing. Guillermo Imery

SECRETARIO

Ing. Rodolfo Jenkins

COORDINADOR DE LA  
ESCUELA DE INGENIERIA  
CIVIL

Ing. René Narváez Morales

*Administración / Escuela de Ingeniería Civil / 33075*

PROYECTO DE INGENIERIA

ASESOR ACADEMICO:

Dr.Ing.Alberto Chiquillo Alas

CONSULTOR:

Ing. José González G.

EXAMEN DE GRADO:

PRESIDENTE:

Dr.Ing. Alberto Chiquillo Alas

PRIMER VOCAL;

Ing. José González G.

SEGUNDO VOCAL:

Ing. Edgard Parker E.

CON TODO CARIÑO,

A MIS PADRES

A MI ESPOSA

A MIS HIJOS



AGRADECIMIENTOS:

A MIS FAMILIARES

A TODOS LOS AMIGOS QUE  
EN UNA U OTRA FORMA --  
CONTRIBUYERON A LA REA  
LIZACION DE MIS ESTU--  
DIOS.

A LA COMISION EJECUTIVA  
HIDROELECTRICA DEL RIO  
LEMPA.

A LA ORGANIZACION DE NA  
CIONES UNIDAS.

APLICACION DE SISTEMAS DE INVESTIGACION  
EN FUENTES GEOTERMALES DE EL SALVADOR

1. Alcance del Trabajo
2. Reseña Histórica
3. Sistemas de Investigación
  - 3.1 Estudios Geológicos
  - 3.2 Estudios Geoquímicos
  - 3.3 Estudios Geofísicos
    - 3.31 Método Magnético
    - 3.32 Método Gravimétrico
    - 3.33 Método Geotérmico
    - 3.34 Método Eléctrico
4. Análisis de los datos obtenidos en la investigación
5. Perforación de pozos profundos
6. Conclusiones y Recomendaciones.

## ALCANCE DEL TRABAJO

El Salvador es la república más pequeña de Centroamérica con una alta densidad de población y un rápido crecimiento de la misma. La economía tiene como base la agricultura, siendo el café, el algodón y la caña de azúcar los principales productos de exportación. En los últimos 10 años, el estado y la empresa privada han impulsado el desarrollo industrial notablemente, dando como resultado un incremento en la demanda de energía eléctrica, del orden de un 14% anual.

Para hacer frente a esta demanda, el país ha hecho uso de las fuentes convencionales de energía como son la hidráulica y la térmica. Los recursos hidráulicos en nuestro medio son muy limitados y las plantas hidroeléctricas tienen una producción sujeta a las variaciones de nuestro régimen de lluvia. Por otra parte, el costo del combustible necesario para la generación en plantas termoeléctricas significa una fuerte fuga de divisas para la economía del país. Todo lo anterior no permite una expansión, en materia eléctrica, que pueda satisfacer los requerimientos de una población siempre creciente y con nuevas necesidades.

Una cadena volcánica atraviesa El Salvador y da lugar a numerosas manifestaciones externas de actividad geotérmica entre las que se encuentran los Ausoles de Ahuachapán. El Tronador en Berlín, La Viejona en Chinameca. La existencia de estas fuentes de energía potencial ha despertado el interés del Estado, al grado de dedicar esfuerzos y recursos para su aprovechamiento.

Los adelantos obtenidos en la exploración, explotación y utilización de energía geotérmica en diferentes partes del globo son manifiestas, citándose como ejemplos: el campo geotermal de Larderello en Italia, con una capacidad instalada de 400,000 kw; Wairakei, Nueva Zelanda con 192,000 kw; Big Geysor, California, USA, con 65.000 kw instalados y 100.000 más en proceso de instalación, además en otros países como Japón, Rusia, México, Islandia se están intensificando los estudios con el mismo fin.

Con el propósito de investigar las facilidades técnicas y económicas del desarrollo geotérmico en el país y poder utilizarlo en la producción de energía eléctrica, ha sido creada la Oficina de Estudios de Recursos Geotérmicos, mediante la colaboración de la ONU, y el Gobierno de El Salvador, siendo designados el Fondo Especial de las Naciones Unidas para el Desarrollo y la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Pío Lempa como organismos encargados de llevar a cabo los trabajos.

Para llevar adelante el proyecto se inició en sitios de manifestaciones termales externas de El Salvador, una serie de trabajos y actividades encaminadas a proveer datos necesarios para la determinación de lugares apropiados para la perforación de pozos profundos; éstos conducirán el vapor a la superficie y quedarán en observación por un tiempo prudencial, para determinar la capacidad de los depósitos encontrados y la calidad del vapor.

El presente trabajo tiene como finalidad informar acerca de las diferentes actividades mencionadas en el párrafo anterior. Estas acti

vidades comprenden: estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos. Por medio de los estudios geológicos se hace un reconocimiento preliminar, el cual incluye entre otros aspectos la ubicación de fallas, fuentes termales, afloramientos de intrusiones, etc. El estudio geoquímico comprende análisis de aguas, gases y suelos. En cuanto a los estudios geofísicos, que básicamente son los que sirven para determinar los sitios de perforación de los pozos, se recurre a varios métodos que se tratarán en este trabajo.

## RESEÑA HISTORICA

Recibe el nombre de energía geotérmica, la que se obtiene del calor interno de la tierra. Desde tiempos antiguos se ha reconocido por medio de manifestaciones externas (actividad volcánica, fuentes termales, etc.), que el interior de la tierra tiene una temperatura más elevada que la de la superficie. El primer uso práctico que el hombre hizo de las manifestaciones térmicas, fue posiblemente la construcción de balnearios o termas, sobre todo en Europa y el Medio Oriente en donde existen todavía vestigios de ese tipo de construcciones. ✓

A principios del siglo XIX, se hizo la primera tentativa de explotar en escala industrial la zona térmica de Larderello, Italia, con el propósito de obtener ácido bórico. La producción geotérmica de electricidad, a la que se llegó después de casi un siglo en que solo se obtenía ácido bórico y otros productos químicos del vapor, se remonta a experimentos realizados en 1904 y sobre todo en 1912, -- cuando se instaló en Larderello, Italia, la primera turbina con un generador de 250 kilovatios. Prosiguió luego una evolución gradual y últimamente muy rápida hacia la producción de electricidad. Actualmente Larderello cuenta con una capacidad total que pasa de -- los 400,000 kilovatios. ✓

Al ejemplo de Italia le siguieron diversos países en los últimos años, así tenemos que en 1960 Nueva Zelanda inauguró una planta de 69,000 kilovatios, teniendo en la actualidad 192,000 kilovatios -- instalados..

Las manifestaciones geotérmicas en El Salvador son numerosas y conocidas desde hace muchos siglos. Las más reconocidas son: Los Asoles de Ahuachapán; "El Tronador", en la jurisdicción de Berlín; "La Viejona", en Chinamsca; "Agua Caliente", en el área de Sta. Rosa de Lima y otros.

Los lugares antes mencionados fueron considerados por mucho tiempo únicamente como curiosidades naturales y sitios de recreo y turismo. En el año de 1953 se empezaron en El Salvador las investigaciones geotérmicas con la recopilación de toda la información relativa a los lugares donde existían manifestaciones geotermales. La primera perforación explotatoria se efectuó en 1956, en el campo geotermal denominado "Agua Shuca", en la jurisdicción de Ahuachapán. Debido a razones económicas y a la falta de personal técnico especializado para llevar adelante los trabajos, éstos fueron suspendidos en el año de 1959.

En 1959 las exploraciones geotermales fueron continuadas mediante la colaboración y asistencia del Fondo Especial de las Naciones Unidas. Esto se hizo en forma de un proyecto del Fondo Especial denominado: "Investigación de los recursos geotermales en El Salvador". Esto fue llevado a cabo como un proyecto piloto ya que se trataba de establecer si el desarrollo geotermal era económicamente factible en El Salvador, pues las posibilidades de explotar los recursos del Río Lempa, son limitadas.

SP

Es por lo tanto un asunto de verdadera urgencia para el país, determinar si el desarrollo de recursos geotérmicos para producir energía eléctrica puede complementar al de las fuentes hidroeléctricas. Los trabajos ya realizados indican que esto puede ser factible, tomando en cuenta las diversas manifestaciones geotérmicas existentes en el país.



### SISTEMA DE INVESTIGACION

Las manifestaciones externas, como fumarolas, fuentes de agua hirviendo, terrenos que emanan vapores, etc., han servido hasta ahora como signos indicadores de la existencia de energía geotérmica en determinados sitios. Pero estos fenómenos superficiales no demuestran por sí mismo que la energía geotérmica en ese lugar sea económica y técnicamente explotable, ni tampoco proporcionan el medio para establecer un cálculo cuantitativo del potencial de energía en esa zona.

De lo arriba mencionado puede deducirse que las manifestaciones superficiales de vapor y agua caliente, en lo que respecta a los recursos de energía explotable, tienen similitud con los afloramientos de grasas en las zonas petroleras, puesto que constituyen una indicación alentadora, pero no garantizan el éxito de la exploración. En general puede decirse que toda manifestación superficial de agua con temperatura de 50°C o más, merece una investigación a fondo.

La investigación detallada por medio de la geología, la geofísica y la geoquímica permite seleccionar aquellas áreas cuyas características indican la existencia de energía capaz de ser utilizada. Con base en estos estudios se localizan los sitios más apropiados para la perforación de los pozos que servirán para conducir el vapor desde los depósitos a la superficie.

Los sistemas de investigación en la exploración geotérmica son análogos a los aplicados en la industria del petróleo. Todo progra

ma de exploración debe comenzar por un reconocimiento geológico de la región. El objeto es localizar y examinar todas las zonas térmicas del territorio que se desean estudiar y seleccionar las que aparentemente tengan el mayor potencial económico, con el fin de investigarlas a fondo. Por otra parte deberán tomarse muestras de agua y gases no condensables de todas las zonas térmicas, para su análisis químico, así como también muestras de todos los minerales existentes en tales zonas.

De las zonas térmicas con potencial económico y con base en los datos geológicos recogidos podrá considerarse cuáles zonas merecen un examen más detenido.

Este examen tiene por objeto delimitar el campo geotermal y comprende los siguientes aspectos:

- a) Estudio de la temperatura del terreno: La temperatura de la superficie terrestre se mide a una profundidad que varía entre 1.50 y 30 metros. Este estudio es rápido y poco costoso.
- b) Estudio del gradiente térmico. Este incluye el perforado de varios pozos de hasta 100 metros de profundidad y la medida de la temperatura del terreno a esa profundidad. Sirve para determinar el flujo del calor del subsuelo a la superficie y, por consiguiente, para delimitar la amplitud de la zona térmica.
- c) Estudio del magnetismo. Las variaciones de intensidad del campo magnético de la tierra alrededor de la zona geotérmica dan, con frecuencia, una indicación de la extensión lateral de la zona térmica en el subsuelo, porque los minerales magnéticos contenidos en las rocas se alteran rápidamente a causa de la

actividad hidrotérmica y esto tiene como consecuencia la formación de una banda de baja intensidad magnética en dicha zona. Estudio de la gravedad. Este permite determinar las variaciones del campo de gravitación de la tierra alrededor de la zona térmica, lo cual es importante para interpretar la estructura geológica del subsuelo de la zona investigada.

- a) Estudio de la resistividad eléctrica. Con esto se obtiene una indicación de la estructura geológica del subsuelo y la extensión lateral de la zona térmica, puesto que el agua caliente tiene normalmente una resistencia eléctrica más baja que las zonas adyacentes saturadas con agua fría.

## ESTUDIOS GEOLOGICOS

La corteza terrestre está compuesta por una inmensa variedad de rocas, las cuales se formaron por el enfriamiento de la materia ígnea que constituía la totalidad de la tierra y que ahora, se supone, se encuentra formando el núcleo de este planeta. Las rocas así formadas se encontraron constantemente atacadas por la materia ígnea proveniente del interior de la tierra y por los agentes externos, todo lo cual causó profundos cambios en la estructura de las rocas, dando de esta manera origen a otras variedades.

A pesar de la gran variedad, las rocas han sido clasificadas en los tres grandes grupos siguientes: Rocas ígneas, Rocas metamórficas y Rocas sedimentarias (1, p.11).

Las rocas ígneas son las primeras que se formaron; luego, por efecto de las altas presiones y temperaturas, sufrieron cambios y resultaron de ellas las rocas metamórficas. Los agentes externos desvastaron las rocas anteriores que se encontraban en la superficie y llevaron el producto de esta erosión a otros lugares de la superficie terrestre en donde se acumularon, formándose de esta manera las rocas sedimentarias. Finalmente, aún después de formados estos tipos de rocas, la materia ígnea siempre ha irrumpido en la corteza terrestre dando origen a un nuevo tipo de rocas. Si este magma asciende hasta la superficie, a las rocas así formadas se denominan extrusivas y si se queda dentro de la corteza, sin aflorar a la superficie, se denominan rocas intrusivas.

El relieve de la corteza terrestre ha sido y continúa siendo modificado por los fenómenos geológicos internos y los agentes externos. Los fenómenos geológicos internos comprenden los fenómenos tectónicos que originan las montañas y depresiones, rompen e invierten los estratos de la corteza terrestre; la actividad y efectos de los volcanes y los movimientos sísmicos. Los agentes externos comprenden el viento, la lluvia, la nieve, el mar, las corrientes de agua superficial, las manifestaciones geotermales, el hombre, los animales, las plantas, etc.

Entre las manifestaciones geológicas que más influyen en el cambio de la corteza terrestre está la actividad volcánica, la cual produce ordinariamente materiales denominados piroclásticos.

Piroclásticos: son los materiales de tamaño y naturaleza variada -- lanzados por los volcanes en sus erupciones; cuando estos materiales no se han consolidado están compuestos de polvillo, cenizas, lapilli, bombas, etc. El polvillo y las cenizas son materiales de elementos muy pequeños que a veces se encuentran formando capas o bancos; el lapilli sólo se diferencia de las cenizas por ser sus elementos de tamaño un poco mayor.

Cuando las masas de polvillo, cenizas y lapilli se consolidan reciben el nombre de tobas volcánicas, las cuales según la naturaleza de la lava que las originó, reciben nombres como tobas andesíticas, basálticas, porfiríticas, etc. Cuando los piroclásticos gruesos, como las bombas y fragmentos grandes, se consolidan, dan origen a los denominados aglomerados.

Detritos o clásticos: son fragmentos procedentes del interior de la tierra o por la acción de los procesos que tienen lugar en la superficie terrestre. Atendiendo al tamaño de estos fragmentos reciben los nombres de guijarros, gravas, arenas, limos, etc. Cuando los guijarros son redondeados por la acción del trabajo de que han sido objeto por parte de los agentes exteriores reciben el nombre de cantos rodados.

#### DIVISION GEOMORFOLOGICA DEL TERRITORIO NACIONAL

Desde el punto de vista geomorfológico, el territorio de El Salvador, se divide según lo enuncia el Dr. Seeger, (2, pag 5-26) en las seis unidades estructurales geológica-tectónicas siguientes: Planicie Costera, Cadena Costera, Fosas Central e Interior, Cadena Interior y la Montaña Frontera.

La Planicie Costera ocupa aproximadamente un 12% del territorio nacional y se extiende entre el Océano Pacífico y la Cadena Costera. Los materiales que constituyen esta región son de una inmensa variedad, por cuanto la alta precipitación pluvial y los numerosos ríos que llegan a la planicie arrastran grandes cantidades de sedimentos que se depositan debido a la escasa pendiente que predomina en esta región, al grado que muchos ríos pierden su cauce en las proximidades del Océano.

La Cadena Costera ocupa también un 12% del territorio nacional; se inicia generalmente dentro del mar, sirve de base a la Planicie Costera y continúa en el norte hasta llegar a las cumbres. Los materiales predominantes son aglomerados gruesos, capas de lava, tobas cubiertas en parte por bancos de piroclásticos. Las corrientes superfi

ciales de agua de esta región ocasionan, debido a las fuertes pendientes, intensa erosión, desembocando generalmente en dirección Sur. En la cadena costera es donde se encuentran las principales manifestaciones geotermales del país.

La Fosa Central ocupa un 26% del territorio y se encuentra situada entre la Cadena Costera y la Cadena Interior. En la Fosa Central se encuentran masas volcánicas constituidas por cenizas, pómez, escoria, lapilli, toba y lava. Los espacios entre los volcanes se encuentran rellenos también por materiales piroclásticos muy permeables.

La Cadena Interior ocupa un 20% del territorio, separando en el occidente del país a la Fosa Interior de la Fosa Central y confundiendo con la montaña Frontera en el Oriente. Aquí se encuentran algunos macizos volcánicos, como el de Guazapa, Cacaguatique.

La Fosa Interior sólo representa el 6% en el área del territorio nacional, ocupando la región NW de la República. Esta fosa es una llanura formada con materiales volcánicos.

La Montaña Frontera ocupa aproximadamente un 25% del área del territorio nacional. La superficie de esta Montaña ha sido fuertemente descompuesta por los agentes externos a través del tiempo, encontrándose muchas partes de ella intensamente erosionadas.

#### Tipos de Campos Geotermales. (3, pag 5)

Se puede distinguir esencialmente entre dos diferentes tipos de manifestaciones geotermales según su ambiente geológico, los que po-

dríamos llamar tipo Larderello y tipo Nápoli, tomando estos lugares italianos como campos típicos.

#### Tipo Larderello

Las manifestaciones geotermales ocurren en áreas no-volcánicas; eso quiere decir que no se encuentran rocas intrusivas y volcánicas por lo menos hasta distancias considerables de las manifestaciones, y hasta miles de metros de profundidad.

El gran espesor y la distribución considerable de rocas sedimentarias que forman capas uniformes de gran extensión llevan a una uniformidad del subsuelo, aunque las capas estarían dislocadas tectónicamente, lo que hace posible una circulación poco complicada de los fluidos del subsuelo.

El vapor asciende de un cuerpo magmático de gran profundidad por las series sedimentarias, y puede aparecer en la superficie o directamente, o después de haber estado en contacto con agua subterránea de origen meteórico. En este último caso el vapor calienta el agua subterránea, condensándose en ésta parcialmente o hasta tal grado que en unos casos las manifestaciones superficiales solamente consisten de agua caliente.

#### Tipo Nápoli

Las manifestaciones geotermales se presentan en regiones volcánicas, eso quiere decir en zonas donde por lo menos hasta una profundidad considerable y de una extensión grande se encuentran solamente materiales piroclásticos, efusiones de lava e intrusiones magmáticas.



La ausencia, en la mayoría de los casos, de capas protectoras, y la permeabilidad grande de las rocas junto con una fracturación pronunciada hasta profundidades considerables, no solamente permiten una difusión grande de los fluidos ascendentes, sino también llevan a una infiltración del agua meteórica en grandes cantidades, a veces de tal grado que casi no se manifiesta un calentamiento del agua. La distribución entre estos tipos de campos geotermales no solamente tiene valor teórico, sino también importancia práctica.

Mientras que la explotación de un campo del tipo Larderello es relativamente simple por la uniformidad del subsuelo y se puede verificar su exploración según ciertas reglas, ofrecen los campos del tipo Nápoli mayores dificultades para su explotación, sobre todo causadas por la irregularidad del subsuelo. En este último caso la explotación se debe basar en los resultados de las investigaciones locales, avanzando paso por paso y siguiendo la exploración según los resultados que se obtengan. Las áreas geotermales de El Salvador se consideran clasificadas en el tipo Nápoli.

La República de El Salvador está constituida geológicamente por rocas principalmente ígneas y sus derivados, excepto en su extremo noroccidental en que afloran rocas sedimentarias probablemente del Jurásico Superior o Cretácico Inferior, no siendo aún definitiva esta edad pues la pobreza de fósiles no ha permitido su determinación exacta en la columna estratigráfica. (4, Pag. 3)

La parte central del país la forma un hundimiento o Fosa Tectónica (Graben) de orientación NNW-SSE, rellena con derrames lávicos y piroclásticos provenientes de una serie de volcanes Pleistocénicos

y Recientes alineados a lo largo de las dos grandes fallas, que al norte y al sur limitan la citada Fosa.

La roca basal y encajonante de la Fosa Tectónica está representada también por rocas ígneas extrusivas y piroclásticos, todos del Plioceno y Plio-Pleistoceno, constituyendo dos cadenas volcánicas de orientación NW-SE, una al norte y otra al sur de la mencionada Fosa, conocidas como Cadena Interior y Cadena Costera respectivamente. Ascendiendo hacia el norte de la Cadena Interior se tiene una depresión conocida como Fosa Interior, por la cual corre el Río Lempa. Esta fosa interior está limitada en su extremo norte, noreste y noroeste por la Montaña Frontera, constituida por la serie sedimentaria del Jurásico-Cretácico y por la serie en parte intrusiva "Chalatenango" de edad no determinada. Descendiendo hacia el sur y suroeste de la Cadena Costera se tiene la Planicie Costera, constituida por aluviones Recientes y Pleistocénicos y que forma el límite sur Continental de la República de El Salvador.

Los principales rasgos estructurales atraviesan al país con dirección WNW-ESE o sea en general el fallamiento que produjo la Fosa Central tiene un paralelismo pronunciado a todas las estructuras proexistentes. Esta orientación estructural se continúa hacia Guatemala al noroeste y hacia Nicaragua al suroeste, presentando su más clara expresión en el Golfo de Fonseca. El fuerte tectonismo a que han estado sometidas todas estas unidades geológicas, ha provocado además del fallamiento principal NW-SE, un fracturamiento secundario con dirección este-oeste, y otro perpendicular al principal; siendo aparentemente en el cruce de estos sistemas de fracturas que

se han formado los principales aparatos volcánicos. Es asimismo en estos cruces y en las laderas de algunos volcanes Cuaternarios, que se tienen los principales campos geotérmicos del país. Estos campos están por lo general representados por las formas comunes de manifestaciones, es decir, fumarolas, aguas y lodos hirvientes, zonas de alteración y caolinización, etc., excepto aquellos que aparentemente no están relacionados con un vulcanismo reciente y cuya presencia esté representada en general por aguas hirvientes y escapes de vapor, pero que no muestran una fuerte alteración o caolinización en la roca a través de la cual escapan; ésto y la ausencia de depósitos minerales en las cercanías de los manantiales indican que no son aguas sumamente ácidas y que su relación con una fuente magmática directa es reducida. De ello y de las altas temperaturas medidas (85°C a 98°C), se piensa que algunas de estas zonas (como la de Sta. Rosa de Lima y Río Torola) pueden estar siendo alimentadas calóricamente por alguna fuente poderosa que a profundidades grandes tenga un sistema de convección, el cual acarree a la superficie calor, para por conducción, transmitir este calor al agua saturante de estratos permeables con suficiente energía aún, para hacerla entrar en ebullición. En base a estas observaciones generales se ha efectuado una clasificación de los campos geotérmicos de El Salvador en tres tipos principales:

- a) Aquellos relacionados directamente con escapes volcánicos ya sea en sus cráteres o en sus flancos.
- b) Aquellos cuyas manifestaciones no aparentan tener relación directa con vulcanismos reciente y localizados en campos vol

cánicos antiguos y

- c) Aquellos cuyas intensas manifestaciones están íntimamente ligadas con zonas volcánicas recientes y activas.

Desde luego de estos tres grupos, el que ofrece mejores posibilidades de aprovechamiento inmediato y más seguro es el tercero (c).

La zona geotérmica de Ahuachapán es parte de la Fosa Tectónica (graben) de la República en su área más oeste. Aquí toda la deposición es del vulcanismo joven (pleistoceno); los terrenos antiguos - prácticamente no afloran en la región y subyacen bajo unos 300-400 metros del relleno joven. El basamento consiste de rocas de edad - pliocénica cuyas características generales son: su poca permeabilidad (de fracturas aisladas) y su fuerte formación de suelos arcillosos; estas rocas son en gran parte aglomerados densos, lavas o lahares (5, pag 2).

La parte norte de la región estudiada es predominante, una extensa planicie de toba café interestratificada con pómez grueso de espesores que van desde unos 2 metros hasta varias decenas, según la aproximación al grupo de volcanes del Sur; estos sedimentos sobreyacen a tobas fundidas de color gris claro, fuertemente compactadas, las que afloran en diferentes puntos con extensiones variables; quizás el mayor afloramiento sea el del río Frío, habiendo otros en río Agua Caliente, San Raimundo, etc. Los espesores de estos horizontes levantados en el campo llegan hasta unos 100 metros y lateralmente deben extenderse ampliamente ya que se pueden reconocer en muchos lugares. Sus características principales son su dureza, textura fluidal y su baja, casi nula, permeabilidad; en el pozo PA-3 perfo

rado por Durr en Playón de Ahuachapán se interceptan estas tobas, lo que da una idea de su extensión (Distancia entre PA-3 y afloramientos río Agua Caliente = 9 km); subyaciendo a las tobas fundidas se encuentran tobas muy intemperizadas con intercalaciones de pómez y distribuidas por todo el área.

Siempre sobre esta planicie y más o menos entre San Lorenzo, Chinamas, río Paz (al W) afloran tobas aglomeráticas generalmente de color gris oscuro, muy desmenuzables, conteniendo en su masa tobácea, finas partículas de pómez, lava, etc. Los afloramientos importantes están al W de San Lorenzo, cantón Conacaste, Cantón Nance Amarillo, Chinamas siempre en proximidades del cauce bajo del río Agua Caliente, río Paz, Volcán Chinamas.

Sobre el cauce del río Pampa-Paz se localizan lavas de carácter andesítico, algunas veces fracturadas, ligeramente alteradas en ciertos puntos (al NW de San Lorenzo) y formaciones de Sílica y carbonatos. Estas lavas subyacen probablemente a las tobas aglomeráticas. Varios cráteres de explosión se levantan en la planicie, orientados entre sí por posibles líneas tectónicas de rumbo NE. Unos 3 km al NW de Turín el triple cráter Salitre es fácilmente identificable en el campo y las fotos aéreas. En su fondo afloran pequeños manantiales termales ( $T = 37^{\circ}\text{C}$ ), algunas extrusiones de lava y material suelto; en las paredes muy erosionadas afloran tobas y algo de material de explosión, siendo muy frecuentes fragmentos de vidrio volcánico. Al NNE del volcán Salitre y a unos 6 km. de distancia se encuentra el cráter bien conservado del volcán San Lorenzo, cuyo fondo está constituido de tobas y depósitos fluviales. Una línea de debilidad

tectónica como rumbo NNE en el basamento puede ser el origen de los dos cráteres; en la superficie no es posible establecer esa continuidad. Al E del volcán Salitre afloran las fuentes termales en el lugar denominado Playón del Salitre, donde agua subterránea del horizonte saturado es calentada por una fuente importante de calor que emerge probablemente a través de fallas que afectan el basamento - pliocénico; estas no son reconocibles en el propio lugar por su topografía llena, pero si se aprecian numerosas fracturas en el Río - Agua Tibia (N 50 W) y Escalante (N 40 W).

Al sur de la planicie anteriormente descrita, siempre dentro de la fosa (graven) y en proximidad de su límite, se levanta una serie de volcanes jóvenes. Es el grupo Laguna Verde y comprende de E a W los centros volcánicos: Cuyanaúsul, Laguna Verde, Hoyo de Cuajusto, Laguna de las Ninfas, Cumbre de Apaneca, Volcán Empalizada; este último se levanta al W de una amplia cresta, resto de un posible cráter de explosión.

Los depósitos de este grupo consisten de material piroclástico (Pómez, toba café, lapilli) e intercala las extensas coladas de lava andesitobasálticas con espesores de unos 18 a 30 metros, las que son visibles hasta cerca de la carretera Atiquizaya-Ahuachapán. Al N de Ataco, predominan importantes estratos de pómez grueso superpuestos a la toba café; su mayor formación se acumula por las faldas del volcán Empalizada y cresta contigua.

En base de los resultados del estudio geológico efectuado, incluyen do los perfiles-muestras lavadas en algunos sondeos del área de Ahua-



chapán, se estima una serie estratigráfica del relleno joven así

- Pómez grueso
- Lava andesito-basáltico
- Toba café claro
- Relleno joven Pleistoceno Toba fundida gris
- Toba-pómez intemperizada (arcillosa)
- Toba aglomerática gris oscuro
- Lavas poco alteradas
- Basamento del Plioceno Aglomerados densos-tobas fundidas antiguas

La zona geotérmica de Berlín, cuya manifestación externa más importante es el "Tronador" está ubicada en el grupo volcánico Tecapa, el cual comprende además del volcán de este nombre, los centros de actividad denominados: El Hoyón, Laguna Ciega, Las Palmas y Cerro de Alegría.

El grupo volcánico Tecapa corresponde al Cuaternario (Pleistoceno), siendo los materiales de depositación, lavas agrietadas de carácter Andesítico basáltico, en parte expuestas todavía a procesos externos (Meteorización, denudación, etc.); otras, descompuestas por efectos termales.

Se ha identificado también en esta región parte de la cresta de una antigua caldera cuya formación probable sería el final del Plioceno y dentro de la cual se desarrolló un volcanismo más joven. La cresta la forman actualmente los cerros El Cimarrón al W de Berlín y El Cuzco al Norte de la población de Alegría; en el extremo sur de la caldera se encuentra el grupo de volcanes jóvenes (Alegría, Las Palmas, etc.) siendo la cresta norte la que está totalmente des--

truida por efectos tectónicos y erosivos. La depositación exterior de la caldera está constituida por productos piroclásticos como pómez de color blanco y rosado, tobas de color café claro. Dentro de ella están las lavas del grupo Tecapa cubriéndola casi totalmente. Se han identificado, fuera de la caldera, otros volcanes de menor importancia y sin ninguna actividad. Son los cerros de Mercedes Umaña (estrato-volcanes) y cerro El Portillo también probablemente del Pleistoceno.

La geología de la región se complementa con algunas planicies que son áreas de redepositación como son las planicies del Lempa, de Santa Anita y otras.

Casi en general los depósitos volcánicos de la zona de Berlín permiten una infiltración favorable de las aguas meteóricas, ya sean las lavas del volcanismo más joven, pómez grueso del pliopleistoceno ó aluviones recientes. No se conocen estratos impermeables; semi-permeables pueden ser por ejemplo la base de las corrientes de lava. Como consecuencia de lo anterior, mantos de agua subterránea de gran capacidad se extienden en el área estudiada con algunos afloramientos de influencia termal, siendo los desagües naturales fuentes de fuerte caudal como por ejemplo: La de Mercedes Umaña con  $Q=65$  L/S que tiene como estrato conductor una corriente de lava y la fuente Santa Anita con  $Q= \pm 600$  L/S aflorando entre materiales volcánicos sueltos (redespositados). Las dos fuentes anteriores afloran por efectos tectónicos, siendo el área de recarga las alturas de los volcanes jóvenes. El horizonte saturado de agua subterránea se extiende probablemente hasta las orillas del Río Lempa y donde solo aflo-



ran pequeños vertientes termales (Las Burras 78°C de temperatura) cuyo poco caudal depende de la fuerte permeabilidad de los materiales.

En la región afloran también algunos horizontes retenedores en lugares donde la pendiente es mayor. Uno de ellos lo hace por medio de las fuentes Guallinac y Cutuco. (6, pag. 2)

La Zona de Santa Rosa de Lima está situada en el Oriente del país y en los alrededores de la población que lleva el mismo nombre. Está formada por rocas volcánicas y sus derivados, todas ellas del Plioceno según su relación estratigráfica con las rocas volcánicas Pleistocénicas de la Fosa Central. En sí el área en estudio muestra una topografía fuertemente erosionada constituyendo un altiplano hacia el norte y noreste de Santa Rosa. Este altiplano está formado por corrientes principalmente basálticas y andesíticas en las partes elevadas y descansando sobre tobas aglomeráticas. En las partes planas se han depositado materiales provenientes de estas mismas lavas, formando bloques de lavas aluviales en partes y en otras el intemperismo ha descompuesto totalmente estas lavas hasta transformarlas en arcillas de coloración rojiza. Hacia el noroeste la zona está limitada por una gran serranía de orientación NW que asciende hacia la zona de minas de Montemayor, Lola y San Sebastián, constituida por aglomerados fuertemente metasomatizados con algunos afloramientos de rocas intrusivas (dioritas y gabros). Hacia el noreste y cerca de la población del Sauce el altiplano está limitado por afloramientos de tobas riclíticas vitrificadas (ignimbritas) - que constituyen una serranía de orientación NW-SE, que continúa -

hasta las cercanías de Anamorós. Hacia el Sur y Sureste se presentan algunos afloramientos de tobas pumíticas descansando sobre lahares. Estos lahares a su vez subyacen a la sucesión de lavas basálticas y andesíticas del altiplano que constituyen quizá la unidad geológica más joven de esta zona.

Estratigráficamente se pudo observar la siguiente secuencia: aparentemente la roca más antigua en general de la zona está constituida por las tobas vítreas ríolíticas (ignimbrites) y una serie de rocas extrusivas o tobas, totalmente alteradas y ceolinizadas, las que están subyaciendo a aglomerados de coloración verde, metasomatizados y en los que a la clorita ha substituido y alterado los componentes de la roca (4, pag 5).

## ESTUDIOS GEOQUÍMICOS

Los estudios geoquímicos son sumamente importantes para la explotación geotérmica y se efectúan a lo largo de todas las etapas del programa de trabajo.

Estos estudios comprenden principalmente los análisis del agua, vapor y gases, producidos por las manifestaciones geotérmicas superficiales o por los pozos perforados. Su importancia radica en que se puede obtener información acerca del origen de las manifestaciones geotermiales así como también sobre las posibilidades de corrosión u otros factores que puedan afectar los materiales que posteriormente se emplearán para la construcción del equipo de la planta geotérmica.

Además de analizarse las muestras de los fluidos obtenidos de los manantiales calientes y las fumarolas, deben también analizarse las muestras de los gases no condensables que los acompañan y las de minerales y rocas recogidas en las zonas térmicas en estudio. El fluido que se obtiene de los pozos geotérmicos es en general agua con un alto contenido de sustancias químicas, principalmente sales que vienen disueltas en el agua y gases que vienen junto con el vapor.

Las sustancias químicas contenidas en el agua separada del vapor puede originar, como se mencionó anteriormente, problemas de corrosión y depósitos en muy diversas partes de la instalación, como son los siguientes: corrosión de las juntas de expansión de acero inoxidable de las tuberías de conducción de vapor o depósi-

tos de sílice con equipos separadores de vapor.

Es conveniente tener un análisis detallado de los productos químicos, ya que muchos de ellos pueden ser explotados comercialmente, como por ejemplo el ácido bórico.

Los manantiales calientes pueden contener muchas sustancias disueltas en sus aguas, las más importantes de las cuales son las siguientes: sílice, cal y sal común, compuestos de arsénico, fluoruros y ácido bórico. Los gases no condensables contienen frecuentemente cantidades relativamente grandes de bióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno y en cantidades pequeñas, fluoruro de hidrógeno, nitrógeno, metano e hidrógeno así como gases inertes. Usualmente el sulfuro de hidrógeno se descompone rápidamente al contacto con el aire, dando como resultado la acumulación de azufre o la formación de ácidos sulfúricos, los cuales a su vez reaccionan al depositarse en las rocas.

Como resultado de estas reacciones químicas, las rocas situadas dentro de la zona térmica ordinariamente están corrompidas y descompuestas y con bastante frecuencia reducidas a una arcilla blanda.

Este fenómeno se nota particularmente en las zonas térmicas donde la superficie del terreno está por encima de la capa del agua local y el sulfuro de hidrógeno se oxida antes de llegar a la superficie. Esta circunstancia da lugar muchas veces a la formación de charcas de lodo hirviente.

Cuando la zona térmica está situada al mismo nivel o debajo de la capa de agua local, da lugar a la formación de estanques de agua

clara, caliente o en ebullición. Es importante conocer la cantidad de gases no condensables que acompañan al vapor geotérmico, para determinar el tipo de extractores de gases no condensables que deberá emplearse. Los gases están formados principalmente por bióxido de carbono (95%) y ácido sulfhídrico, (2%) siendo el resto formado por hidrocarburos, amoníaco, nitrógeno e hidrógeno.

El ácido sulfhídrico es el que puede causar mayores problemas, pues en presencia del oxígeno la corrosión se acelera, probablemente por la formación de ácido sulfuroso o sulfhídrico. Sin embargo, con el oxígeno ausente, el ácido sulfhídrico forma sobre cualquier equipo construido de acero o hierro dulce, una capa de sulfuro de hierro que protege al metal de ulterior corrosión.

El ácido sulfhídrico también influye para que el cobre y sus aleaciones no deban utilizarse en las partes del equipo que están en contacto con los gases. Cuando esto ocurre se emplean materiales inatacables por el ácido sulfhídrico como la fibra de vidrio, o se aplican recubrimientos sintéticos protectores. El concreto de las estructuras deberá protegerse con pinturas bituminosas o mediante el uso de aditivos que los hagan resistentes a los sulfatos.

Como se mencionó anteriormente, el estudio geoquímico comprende entre otros el análisis del agua proveniente de las fuentes termales o de los pozos perforados.

Atendiendo el origen de las aguas que se encuentran en el subsuelo, se puede hacer la siguiente clasificación (1, Pág 10):

- a) Aguas Meteoricas
- b) " Connatas
- c) " Juveniles

Se consideran como aguas de origen meteorico o vadosas, aquellas procedentes de la precipitación atmosférica que logra percolarse hasta el interior del subsuelo.

Las aguas connatas son aquellas que se encuentran en los intersticios o cavidades de las rocas sedimentarias; estas aguas se encuentran retenidas en dichas rocas desde cuando se formaron; es posible que hayan pertenecido a corrientes o depósitos superficiales. Las aguas connatas se caracterizan por un alto contenido mineral. Las aguas juveniles son el resultado de la condensación del agua en estado gaseoso contenido por el magma terrestre. Reciben también los nombres de aguas magmáticas, aguas volcánicas o aguas cósmicas.

En la conferencia de la ONU que se llevó a cabo en Roma, Italia en agosto de 1961(7,pág 25) se llegó a la conclusión de que casi todo el vapor y el agua caliente -del 90 al 95%-son de origen meteorico, esto es, que proceden del agua superficial que se calienta al penetrar los terrenos por infiltración; el resto, o sea entre 5% y 10%, según lo indica el nuevo procedimiento del estudio de isótopos, podría ser magmático, es decir proveniente del interior de la tierra. La renovación del agua procedente de la superficie supone la necesidad de una infiltración adecuada, por lo menos a largo plazo, para sustituir el volumen de agua caliente extraída de los pozos y plantea la cuestión de saber cuanto tiempo lleva esta circulación del agua. El tiempo de circulación del agua en Larderello pasa de los cu

ronta años, en cambio en Wairakoi se cree que el tiempo de circulación en un sentido es de cincuenta años. Si se extrae la capa superior de agua caliente a velocidad mayor que la de la circulación natural, es evidente que el rendimiento disminuirá. En realidad es difícil estimar, la vida útil de un pozo. En Larderello la vida útil de un pozo de vapor es de unos veinte años y hay varios que siguen activos después de los treinta.

Ya que las aguas juveniles provienen del magma y las aguas meteóricas han tomado parte en el ciclo hidrológico, es de suponer que estos dos tipos de aguas, se pueden distinguir por su composición química. De lo anterior se deduce que el análisis químico indica la importancia de ambos tipos de aguas para determinar las condiciones geotérmicas de la corteza terrestre.

Entre las características que pueden facilitar la distinción, según Valiente (3, pag 110) de los dos tipos de aguas están las siguientes:

- 1) Alto contenido de sustancias en disolución
- 2) Elementos de origen magmático
- 3) Elementos de origen superficial

1. Alto contenido de sustancias en disolución. Todas las rocas en contradas en la litósfera tienen su punto de fusión cerca de -- 1100-1200°C. Aunque tales rocas se encuentran en estado de solidificación, su temperatura estará todavía mucho más alta que la temperatura crítica del agua (374.15°C). Eso significa que todo el H<sub>2</sub>O que va a ser liberada durante el proceso de solidifica--

ción se encuentra en estado gaseoso. Análisis químicos de tales manifestaciones muestran la siguiente composición promedio (como ejemplo típico se incluye un análisis de Larderello, LARDERELLO S.P.A., 1952.

CUADRO N° 1

H <sub>2</sub> O	95.552%	NH <sub>3</sub>	0.030%
CO <sub>2</sub>	4.265%	CH <sub>4</sub> +H <sub>2</sub>	0.019%
H <sub>2</sub> S	0.088%	N <sub>2</sub>	0.016%
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.030%		

Considerando ahora que la solubilidad de los minerales generalmente aumenta con la presión y con la temperatura de su solvente, y por otra parte que el CO<sub>2</sub> (un agente disolvente muy fuerte), es fuera de H<sub>2</sub>O, el constituyente mayor de tales aguas juveniles, se puede esperar que aguas provenientes de un cuerpo magmático cuentan con una alta cantidad de sustancias en disolución. En cambio el agua vadosa, proveniente del agua lluvia, cuenta en forma muy reducida con las características químicas y físicas mencionadas, por lo que su acción disolvente no será tan pronunciada como en el caso del agua juvenil. Por lo tanto la consecuencia será una cantidad de sustancias en disolución relativamente baja. Parece por lo tanto, que por la cantidad de sustancias en disolución se presenta la posibilidad de distinguir entre agua juvenil y agua vadosa:

Agua Juvenil: Contenido de sustancias en disolución relativamente alto.

Agua Vadosa : Contenido de sustancias en disolución relativamente bajo.



## 2. Elementos de origen magmático.

Aunque en la literatura geológica continuamente se encuentran criterios que indican que uno u otro elemento es característico para determinar el origen magmático de un agua, hasta ahora no se ha logrado establecer para la mayoría de dichos elementos un criterio seguro. Por otra parte se sabe que las aguas juveniles son ricas en  $H_2S$  y  $CO_2$  (Cuadro Nº 1). Pero a medida que tales aguas llegan a zonas superficiales de la corteza terrestre el  $SH_2$  se va transformando en azufre y sulfatos. Por lo tanto un alto contenido de sulfatos parece ser generalmente el único determinante para incluir un agua al grupo de las aguas juveniles, además de un alto contenido de  $CO_2$ .

## 3. Elementos de origen superficial

Fuera de la razón  $Ca:Mg$ , que parece ser más alta en el agua vadosa que en el agua juvenil, parece que la detección de isótopos puede ser un criterio para la distinción entre agua vadosa y agua juvenil. Lamentablemente las investigaciones básicas en este respecto no están terminadas todavía.

Tomando en cuenta todas estas consideraciones se llega al siguiente resultado:

Que el agua juvenil cuenta con una cantidad de sustancias en disolución más alta que el agua vadosa, y que un contenido alto de sulfatos y  $CO_2$  indice un origen magmático.

## ESTUDIOS GEOFISICOS

Una de las formas de las investigaciones de campo es la prospección geofísica por medio de la cual se toman medidas físicas en la superficie del terreno mediante instrumentos especiales, para obtener información del subsuelo. Es una mezcla de física y geología, puesto que las medidas físicas se interpretan de acuerdo a las condiciones geológicas del subsuelo. Entre los métodos geofísicos frecuentemente utilizados hay cuatro que han servido en la investigación geotérmica: método geotérmico, gravimétrico, magnético y resistividad eléctrica.

## METODO GEOTERMICO

La parte inicial de la prospección de los campos geotermales consiste en la obtención de datos de los fenómenos geotermales; para ello se utilizan las medidas superficiales de temperatura, cuyos objetivos principales son:

- 1) Proporcionar de una manera relativamente rápida y económica, mapas que muestren el tamaño y situación de áreas de flujo calórico y el sistema hidrotermal que lo origina.
- 2) Proporcionar datos para determinar el flujo de calor natural y sus variaciones antes de la explotación.
- 3) Obtener un registro de las variaciones de la actividad térmica superficial en determinada zona, producidas por las exploraciones, perforaciones de pozos, etc., lo cual conducirá a establecer el verdadero régimen de energía geotermal en la zona.

El método geotérmico se ha aplicado con éxito en la localización de fisuras, grietas o fallas, toda vez que haya una corriente de calor desde las profundidades a la superficie a través de dichas fisuras o fallas. El método es válido para determinar la posición de depósitos de vapor natural en regiones de vulcanismo reciente; el área y forma de la anomalía indican la profundidad del depósito

#### Flujo calórico

Debido a la radioactividad del núcleo y de la corteza terrestre (8, pag 178), hay una corriente o flujo continuo de calor desde el interior hasta la superficie. En regiones en donde no se encuentran anomalías geotérmicas, el flujo específico de calor  $Q$  alcanza hasta un valor de  $1.2 \times 10^{-6}$  calorías/cm<sup>2</sup>/seg.

Con el propósito de encontrar el flujo específico de calor en determinado sitio, es necesario establecer tanto la conductividad térmica de la roca, como el gradiente de temperatura. Si se considera que las dimensiones de la zona son pequeñas en comparación con las dimensiones de la tierra y si se desprecian las variaciones horizontales (flujo radial uniforme), el flujo específico puede considerarse lineal y su valor es dado por el producto del gradiente de temperatura y la conductividad térmica.

El comportamiento térmico de las formaciones rocosas está caracterizado por tres propiedades fundamentales.

- 1) La conductividad térmica (K), o sea el flujo específico de calor que atraviesa una pared de 1 cm. de espesor cuando la diferencia de temperatura es 1° C; se expresa en calorías/cm/seg/°C.

- 2) El calor específico ( $c$ ), que es el calor requerido para elevar en una unidad la temperatura de la unidad de masa; se expresa en calorías/g/°C.
- 3) La difusividad ( $\alpha$ ) es una propiedad derivada de las dos primeras y se expresa en la siguiente forma:  $\alpha = \frac{K}{c \cdot d}$ ; en donde  $K$  es la conductividad térmica,  $c$  calor específico y  $d$  la densidad.

La conductividad de la roca puede ser determinada en dos formas:

- a) Mediciones in situ
- b) Pruebas de laboratorio.

La conductividad térmica depende en gran parte de la composición de la roca. La presencia de sulfatos, óxidos o metales puros aumenta la conductividad. Cuando la conductividad es grande, el gradiente de temperatura en la mayoría de los casos es menor. La presencia de agua entre las rocas mejora la conductividad y por lo tanto ayuda a disipar el calor.

El gradiente geotermal se refiere a la variación de temperatura de la corteza terrestre en función de la profundidad. El gradiente vertical de la temperatura de la corteza terrestre depende de la naturaleza del suelo y varía entre límites muy amplios (5° a 70°C/km).

Se ha observado que la temperatura de la tierra aumenta con la profundidad, y como valor medio se ha tomado 1°C de aumento por cada 30 metros de profundidad. Sin embargo se han podido observar gradientes negativos, es decir disminución de la temperatura al aumentar la profundidad, pero esta situación se debe ordinariamente a --

condiciones especiales, como por ejemplo la cercanía de aguas subterráneas.

Como estas medidas se han llevado a cabo generalmente en minas o pozos profundos, los valores obtenidos difieren de los reales pues al excavar una mina o perforar un pozo, se introduce aire, agua o fango, lo cual altera la temperatura de las paredes del agujero y por consiguiente desfigura los valores verdaderos.

El gradiente de temperatura es elevado generalmente cerca de los cuerpos en fusión ígnea y fuentes termales. Las fuentes termales se supone que son debidas a la presencia de magma cerca de la superficie terrestre. La actividad ígnea cerca de la superficie se manifiesta de diversas maneras, como las que siguen: fuentes calientes, elevación anormal de la temperatura del suelo, erupciones volcánicas. Las corrientes de aguas subterráneas pueden ya sea aumentar, como disminuir la temperatura del suelo. El agua que proviene de un magma en solidificación, calienta la roca por la que circula; otras corrientes de aguas subterráneas contribuyen a refrigerar la roca, disminuyendo el gradiente.

Hay reacciones químicas que también pueden aumentar la temperatura de las rocas, sobre todo cerca de la superficie, en donde el aire puede ponerse en contacto con sulfuros y otros materiales oxidables. Como se dijo anteriormente, para la medida del gradiente geotérmico, mucha información se obtiene de perforaciones de pozos o minas. Cuando se mide el gradiente en perforaciones, es aconsejable usar aquellos pozos que contienen agua o fango en vez de los que solamente contienen aire, porque el agua o el fango son térmicamente -

más estables que el aire y por consiguiente, al introducir los instrumentos de medición, ya sean termómetros eléctricos o de mercurio, pueden tomar menos tiempo para alcanzar el equilibrio.

Entre los factores que pueden modificar el gradiente de temperatura se encuentran:

- 1) Variaciones de conductividad térmica debidas a la composición de la corteza terrestre.
- 2) Proximidad al magma fundido
- 3) Circulación de agua subterránea
- 4) Humedad de la roca.
- 5) Producción o consumo de calor por reacciones químicas
- 6) Efectos de la presión.
- 7) Radioactividad.

Una vez determinado el gradiente térmico y la conductividad térmica, se combinan para dar el valor del flujo específico de calor a través de la corteza terrestre y su relación matemática puede expresarse en la forma siguiente: (3, pag 106).

$$Q = K.G. \text{ (cal./seg/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

siendo:

Q = Flujo específico de calor (cal./cm<sup>2</sup>seg)

K = Conductividad térmica (cal./cm/seg/°C)

G = Gradiente térmico (°C/cm)

El gradiente térmico se define por la siguiente ecuación:

$$G = \frac{t_2 - (t_1 + q)}{Z} \text{ (}^\circ\text{C/cm)} \quad (2)$$

siendo:

t<sub>1</sub> = Temperatura media del aire (°C)

t<sub>2</sub> = Temperatura en profundidad Z (°C)

Z = Profundidad de medición (cm)

q = Corrección (°C) (depende del clima y la altura del lugar).

Combinando (1) y (2), tenemos:

$$Q = k \cdot \frac{t_2 - (t_1 + q)}{Z} \text{ (cal./cm}^2\text{/seg)} \quad (3)$$

La temperatura media del aire ( $t_1$ ) se debe tanto a la radiación solar como al flujo calórico del interior de la tierra. Sea  $t_0$  °C la temperatura media del aire debida a la radiación solar únicamente, si se supone que no hay flujo calórico.

El flujo calórico depende del coeficiente de convección ( $\alpha$ ) de la superficie terrestre. El coeficiente es igual al flujo específico de calor dirigido hacia el exterior a través de la superficie de la tierra, dividido por la diferencia entre la temperatura de la superficie y la del medio exterior que la rodea (aire).

$$\alpha = \frac{Q}{(t_1 + q) - t_0} \text{ (cal./cm}^2\text{/seg/°C)} \quad (4)$$

Combinando (3) y (4) tenemos:

$$t_2 - t_0 = \frac{Q}{K} \left( Z + \frac{K}{\alpha} \right) \quad (5)$$

Tomando como valores normales los siguientes:

$$K = 3 \times 10^{-3} \text{ cal./cm/seg/°C}$$

$$\alpha = 2 \times 10^{-4} \text{ cal./cm}^2\text{/seg/°C}$$

$$Q = 2 \times 10^{-6} \text{ cal./cm}^2\text{/seg}$$

Y una profundidad para mediciones de temperatura, Z = 100 metros.

La diferencia de temperatura se puede calcular por medio de la ecuación (5):

$$t_2 - t_0 = \frac{Q}{K} \left( Z + \frac{K}{\alpha} \right)$$

$$t_2 - t_0 = \frac{2 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-3}} \left( 100 + \frac{3 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-4}} \right) \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_2 - t_0 = 76 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Si  $\alpha \rightarrow 0$ , es decir si no hay convección entonces  $\frac{K}{\alpha} \rightarrow \infty$  y por consiguiente  $t_2 - t_0 \rightarrow \infty$ , esto significa que todo el calor va a ser retenido entre  $Z = 100$  cm y  $Z = 0$ ; lo que da una diferencia de temperatura entre  $t_2$  y  $t_0$  que tiende a infinito.

Por otro lado si  $\alpha \rightarrow \infty$  es decir si hay convección, ideal,

entonces  $\frac{K}{\alpha} \rightarrow 0$ , es decir:

$$\begin{aligned} t_2 - t_0 &= \frac{2 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-3}} (100 - 0) \\ &= 66 \times 10^{-3} \text{ } (^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

De todo lo anterior resulta que el flujo específico de calor desde el interior de la tierra, lleva una diferencia de temperatura (entre 100 cm. y la superficie) de alrededor de  $0.07^\circ\text{C}$ .

Teniendo pues que:

$$t_2 - t_0 = f(Q)$$

Es posible calcular por medio de diferencia de temperatura entre la superficie de medición y la profundidad, el flujo específico en una región.

#### Líneas Isogeotermas:

Reciben el nombre de isogeotermas, las líneas de la tierra que unen los puntos que se encuentran a igual temperatura. Estas líneas suelen ser de forma muy irregular; por lo general se elevan de las masas continentales pasando por los picos en las rocas de basalto --



cristalino y por regiones de actividad volcánica reciente. En las regiones donde no ha ocurrido ninguna deformación durante un prolongado período geológico o en las zonas de mineralización más antigua, estas líneas están más espaciadas debido a la mayor conductividad del suelo.

#### Equipo:

El equipo utilizado para la medida de gradientes se puede clasificar en dos grupos, a saber: los termómetros de máxima y los eléctricos. Por ser ya conocidos los primeros, nos referiremos al segundo grupo.

Los termómetros eléctricos se pueden subdividir en tres tipos principales: par térmico, resistencia de platino y resistencia de termistores.

Al principio se usaron los del tipo primeramente mencionado o sea el par térmico, debido a su ventaja de responder rápidamente a los cambios de temperatura, pero en la práctica se encontró que no deben emplearse en medidas realizadas en pozos profundos, debido a que la longitud de los conductores requeridos ocasionaría una alta resistencia en el circuito.

En cuanto a los termómetros de resistencia de platino, aún cuando son muy precisos, ofrecen ciertos inconvenientes, sobre todo cuando se trata de medidas en pozos, pues el equipo posee un diámetro mayor que el tipo de pozos utilizado (ordinariamente 76 mm).

El termómetro con resistencia de termistores es el más práctico aun cuando el rango de las mediciones sea limitado (sólo registra hasta 150°C como máxima).

Para los fines buscados en el proyecto, la aproximación de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  es suficiente, sin embargo con equipos marca "Yellow Spring Instrument" (YSI) se obtiene hasta  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  de aproximación.

Las medidas mediante sondas efectuadas con termistores YSI se pueden hacer por medio de lecturas directas en teletermómetros o por un puente de Wheatstone empleando tablas del fabricante en que se relacionan resistencia y temperatura.

El montaje del puente de Wheatstone (9, pag 522) representado en la figura N<sup>o</sup> 1, se utiliza mucho para efectuar medidas rápidas y precisas de resistencias. En dicha figura M y N son resistencias variables previamente graduadas (permanecen constantes durante la medida), X representa la resistencia desconocida y P es una resistencia variable. Para utilizar el puente se cierran los interruptores  $K_1$  y  $K_2$  y se modifica la resistencia P hasta que el galvanómetro G no experimente desviación. Los puntos B y C están ahora al mismo potencial, o en otras palabras, la caída de potencial entre A y B es igual a la caída de potencial entre A y C. Asimismo, la caída de potencial entre B y D es igual a la existente entre C y D. Puesto que la intensidad de la corriente en el galvanómetro es nula, la intensidad de la corriente en M es igual a la de N, o sea  $i_1$  y la intensidad de la corriente en P es igual a la de X, o sea  $i_2$ . Entonces, dado que  $V_{AB} = V_{AC}$  se deduce:

$$i_1 N = i_2 P,$$

y puesto que  $V_{BD} = V_{CD}$

$$i_1 M = i_2 X$$

Si se divide la segunda ecuación por la primera, se obtiene:

$$X = \frac{M}{N} P.$$

Por consiguiente, si se conocen  $M$ ,  $N$  y  $P$ , puede calcularse  $X$ . Para facilitar el cálculo, la razón  $M/N$  es, en la práctica, una cierta potencia entera de 10, tal como 0,01, 1, 100, etc.

Durante los tantos preliminares, cuando el puente puede estar lejos del equilibrio y  $V_{VC}$  ser muy grande, ha de protegerse el galvanómetro con el shunt  $S$ . Una resistencia grande comparada con la del galvanómetro, está constantemente conectada entre los bornes del mismo. Cuando el contacto desliza en el extremo izquierdo de la resistencia, no pasa por el galvanómetro fracción alguna de la corriente que circula entre  $B$  y  $C$ . En una posición tal como la representada, la parte de resistencia situada a la derecha del contacto desliza está en serie con el galvanómetro y su combinación está shuntada por la porción de resistencia situada a la izquierda del contacto desliza. Por consiguiente, solo una fracción de la corriente pasa a través del galvanómetro. Con el contacto desliza en el extremo derecho de la resistencia, toda la corriente pasa a través del galvanómetro, excepto la pequeña fracción que pasa por la resistencia. Según esto, el galvanómetro se encuentra completamente protegido cuando el contacto desliza está en el extremo izquierdo de la resistencia y tiene su máxima sensibilidad cuando el contacto está en el extremo derecho.

Si algunas de las resistencias son inductivas, los potenciales  $V_B$  y  $V_C$  pueden tardar tiempos distintos en alcanzar sus valores finales al cerrar  $K_1$ , y si el galvanómetro está conectado entre  $B$  y  $C$ ,

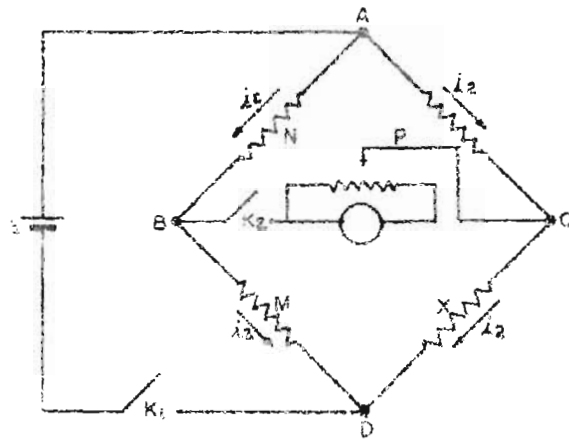


Fig. 1

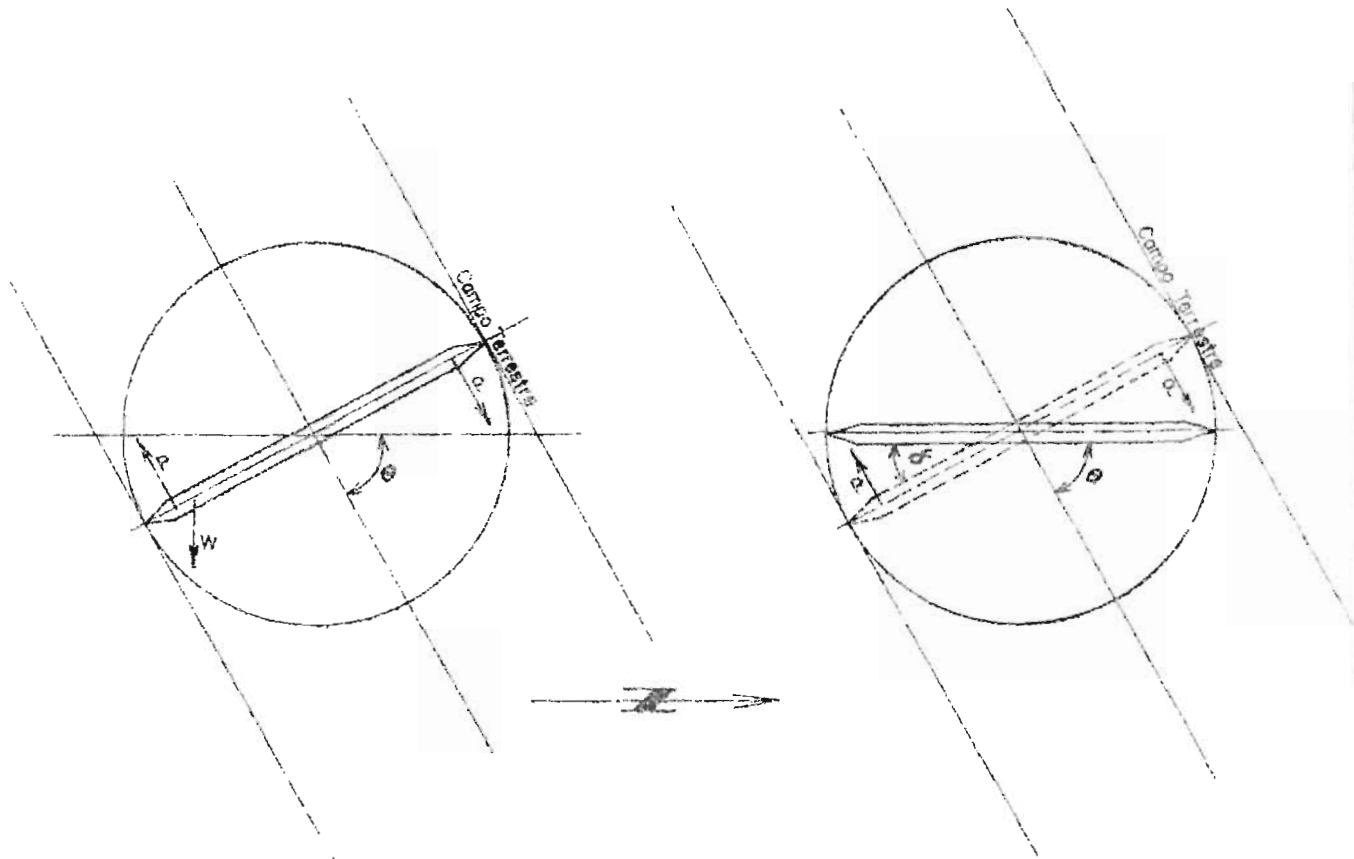


Fig. 2

señalaría una desviación inicial aunque el puente estuviera en equilibrio. Por ello  $K_1$  y  $K_2$  están combinados frecuentemente con una doble llave que cierra primero el circuito de la batería y posteriormente el circuito del galvanómetro, una vez que las corrientes transitorias se han extinguido.

Se utilizan puentes portátiles que contienen un galvanómetro y pilas secas. La razón  $M/N$  puede hacerse igual a una potencia entera de 10, entre 0,001 y 1000, mediante un solo mando, y el valor de  $R$  se obtiene accionando cuatro mandos en forma de cuadrantes.

Cuando las medidas se hacen mediante el uso del termómetro de resistencia de termistores, debe tenerse cuidado al escoger el tipo adecuado, tomando en cuenta entre otras cosas, las características de la zona a investigarse y la precisión deseada.

### METODOS MAGNETICOS

El método magnético de exploración es el más antiguo en la geofísica aplicada. Es empleado tanto para la búsqueda de petróleo como de minerales; en los últimos años se ha utilizado en la búsqueda de energía geotérmica. En la exploración petrolera se emplea este método para determinar el espesor de la sección sedimentaria. Las rocas sedimentarias ejercen una influencia magnética tan pequeña, comparada con las rocas ígneas subyacentes, que prácticamente todas las variaciones de la intensidad magnética capaces de ser medidas en la superficie, están directamente relacionadas a la topografía o a los cambios litológicos del subsuelo. En la exploración minera el método es empleado directamente en la búsqueda de minerales magnéticos y algunas veces en la búsqueda de minerales no magnéticos cuando estos están asociados con materiales magnéticos. En la investigación geotérmica el método magnético se aplica cuando la alteración hidrotermal de ciertas rocas produce un decrecimiento en el magnetismo debido a la disminución de minerales ferromagnéticos en ellas, registrándose por consiguiente la correspondiente disminución de la intensidad respectiva en las áreas de actividad térmica.

El método magnético tiene similitud con el gravimétrico, ya que en ambos métodos se buscan anomalías originadas por los cambios de las propiedades físicas de las rocas subyacentes. En la mayoría de los casos tanto el método magnético como el gravimétrico se utilizan en reconocimientos preliminares y asimismo requieren técnicas

análogas de interpretación. Sin embargo, el método magnético es más complejo que el gravimétrico por la razón siguiente: la propiedad de una roca que determina su intensidad de magnetización, tiene no sólo magnitud sino también dirección mientras que la masa, propiedad física que determina el campo gravitatorio, única--mente tiene magnitud. Los efectos magnéticos de las rocas pueden estar influidos por vestigios pequeños de ciertos minerales, --mientras que los efectos gravitatorios de las rocas dependen --principalmente de sus constituyentes fundamentales.

Los métodos magnéticos están basados en las medidas de pequeñas variaciones en el campo magnético. Estas variaciones se atribuyen a los cambios de estructura en ciertas rocas cercanas a la superficie o a la susceptibilidad magnética de las mismas. Las rocas sedimentarias generalmente tienen una susceptibilidad muy pequeña en comparación con las ígneas y metamórficas.

Los instrumentos empleados en las mediciones son magnetómetros - muy sensibles, capaces de detectar los valores de la intensidad magnética relativa. La variación medida es interpretada en térmi nos de la distribución probable del material magnético debajo de la superficie, la cual a su vez es la base para inferir las condiciones geológicas probables.

Con la prospección magnética se miden variaciones de la intensidad del campo magnético terrestre. La unidad tipo de la intensidad de campo es el Oersted. El campo magnético de la tierra es - de  $\frac{1}{2}$  Oersted, esta unidad es demasiado grande para poder ser u-

utilizada prácticamente en prospección, pues las variaciones que se miden son menores que la milésima de esa cantidad. La unidad más usada en la práctica geofísica es la gamma, o sea  $10^{-5}$  Oersted.

Para poder estudiar las anomalías magnéticas originadas por masas situadas a unos centenares de metros de profundidad, o incluso menos, debemos conocer previamente los cambios mayores del campo magnético terrestre para que estos puedan ser eliminados. Afortunadamente, sobre ese aspecto se dispone de bastante información, pues durante los últimos cien años se han realizado mediciones del campo magnético terrestre cubriendo todo el mundo tanto en observatorios magnéticos como por medidas sistemáticas de campo.

Los efectos gravitatorios de la tierra varían en una forma sencilla y predecible en función de la altitud y latitud del punto considerado de modo que las reducciones necesarias son calculadas en forma rutinaria. Pero este no es el caso de las variaciones magnéticas, que no son simple función de la latitud o longitud sino mucha más irregulares; además hay variaciones con el tiempo; y por todo esto los ajustes de los datos magnéticos necesitan mucho más cuidado y precisión que en el caso de los gravimétricos. (8, Pag 30)

En los primeros tiempos de la prospección magnética de minerales, el instrumento más empleado fue la brújula de inclinación, que es una aguja imantada que puede moverse libremente en un plano vertical y que lleve fijado a un lado del eje un peso ajustable. El peso es desplazado hasta que aguja quede aproximadamente horizontal y en equilibrio entre los pares de torsión gravitatorio y magnético. (Figura 2).



Cualquier variación de la componente vertical del campo terrestre cambia el momento de la fuerza magnética, y por lo tanto el ángulo de inclinación de la aguja. La inestabilidad es debido a que cualquier pequeña desviación de la horizontal del brazo contra peso, originada por una variación de la atracción magnética sobre el imán, disminuirá el momento de gravedad opuesto y con ello aumentará la rotación iniciada por la variación del campo magnético exterior. La sensibilidad puede ser regulada variando el ángulo que forman los dos brazos (El ángulo que gira los brazos entre una y otra lectura puede ser transformado en variación del campo total empleando curvas construidas empíricamente, por calibración). Si bien el instrumento fue concebido originalmente para medir variaciones del campo total, puede ser enviada también para medir variaciones del campo vertical, orientando su plano en una dirección perpendicular al meridiano magnético.

El magnetómetro tipo Schmidt es el instrumento magnético de uso más corriente para la prospección en tierra. Consiste, en un principio, en un imán pivotado cerca, pero no el centro de su masa, de manera que el campo magnético de la tierra origine un par de torsión en el torno del pivote, opuesto al par de torsión de la atracción gravitatoria sobre el centro. El ángulo para el cual se alcanza el equilibrio depende de la intensidad del campo. Para conseguir una elevada sensibilidad se requiere una gran cantidad de trabajo de precisión en la disposición y construcción de los sistemas mecánico y óptico. En condiciones favorables los magnetómetros tipo Schmidt, responden a pequeñas variaciones en las componentes del campo magnéti-

co con la precisión de una gamma.

En la exploración petrolífera, el magnetómetro puede a veces localizar trampas sedimentarias de petróleo, recogiendo anomalías en el campo magnético terrestre por estructuras emplazadas por debajo del basamento. Cerros enterrados, anticlinales y fallas en las rocas ígneas metamórficas, son reflejados con frecuencia en la estructura de las formaciones petrolíferas suprayacentes. Las exploraciones mineras con el magnetómetro pueden revelar la presencia de fallas someras, diques y otros intrusivos, así como yacimientos de magnetita o ilmenita. El magnetómetro se utiliza con frecuencia para buscar estructuras subterráneas favorables al depósito de menas y en tales casos la mena por sí misma puede no ser magnética, pero estar asociada estructuralmente a rocas que son descubiertas con el magnetómetro.

En las exploraciones magnéticas del petróleo, las estaciones suelen estar espaciadas entre 1 y 2 Km. poco más o menos. En la exploración minera, las estaciones están mucho más próximas, hasta 7.5 m. Independientemente de la finalidad buscada, las estaciones deben ser situadas lejos de todos los objetos de hierro que pudieran interferir con el campo normal. No debe haber vías de ferrocarril a menos de 120 m., ni automóviles a menos de 25 m. ni cercas de alambre a menos de 30 m. (especialmente en dirección Norte-Sur). Además el operador debe llevar encima de su persona la mínima cantidad de material magnético. Si se utiliza un solo instrumento para la exploración, se elige una estación base al empezar el día y se dispone un itinerario que permita hacer en ella lecturas de retorno cada vez que se hayan

hecho unas cuantas estaciones en el campo. El procedimiento es muy semejante al empleado en la prospección por gravedad y con las diferencias halladas se construye una curva de variaciones comparable a la curva de deriva en los trabajos por gravedad. Otro procedimiento consiste en emplear dos instrumentos, un magnetómetro en la estación base y otro de campo. De este modo no es necesario volver a la base con el magnetómetro de campo para hacer comprobaciones al final del día, puesto que el magnetómetro de la base está adaptado para registrar continuamente las variaciones en la estación base. Cualquiera diferencia entre las lecturas relativas al principio y al final del día es distribuida entre las estaciones hechas durante el día.

Operando con el magnetómetro de Schmidt, constituye una buena práctica ocupar dos sitios en cada lugar, distantes unos 15 m y para eliminar las perturbaciones locales, hacer cuatro lecturas en cada estación, dos de ellas con el polo norte del imán del magnetómetro apuntando al Este y las otras dos apuntando al Oeste, teniendo el mayor cuidado en la nivelación y orientación del instrumento.

En las últimas décadas ha cobrado impulso enorme el método de levantamientos magnéticos empleando magnetómetros aerotransportados al grado que en la actualidad todas las operaciones en gran escala se hacen por medio de este sistema.

Las ventajas de las medidas geomagnéticas hechas desde el aire fueron reconocidas mucho antes de que, para hacerlas posibles, fueran perfeccionados los instrumentos apropiados, siendo la más evidente la rapidez con que pueden ser ejecutados los trabajos. Otra ventaja es la posibilidad de eliminar los efectos magnéticos perturbadores debidos a las irregularidades próximas a la superficie que dificultan

el reconocimiento de las anomalías de bajo gradiente, que son originadas por las estructuras geológicas profundas; otra más aún, la posibilidad de obtener datos sobre regiones pantanosas junglas y otros terrenos inaccesibles a los equipos de prospección terrestre.

Las lecturas magnéticas tomadas en el campo se sitúan en mapas y se trazan las curvas correspondientes, las técnicas de interpretación son parecidas a las empleadas en la prospección gravimétrica. En áreas con rocas sedimentarias en superficie los mapas indican con frecuencia la estructura de la superficie superior del basamento ígneo.

El enfoque cualitativo de la interpretación magnética, empleado con frecuencia, no está limitado a dibujar tendencias. Las variaciones en la separación de las curvas proporciona, con frecuencia, un criterio útil para indicar la estructura. Cuanto más próximas estén las curvas, es decir, mayores las pendientes, más somero estará en general el origen. Cualquier cambio rápido en el espaciamiento en una distancia apreciable indica una discontinuidad en la profundidad, posiblemente una falla. Los límites de una cuenca sedimentaria pueden ser delimitados, frecuentemente de la misma manera. Asimismo, las partes más profundas de tales cuencas pueden ser las áreas con menores gradientes magnéticos.

Un procedimiento cualitativo usado con frecuencia en minería, consiste en construir mapas geológicos a partir de datos magnéticos que indiquen contactos de rocas, eje de fallas, direcciones de buzamiento, etc. La identificación de las rocas y las estructuras se

hace por los afloramientos geológicos que, con frecuencia, son observables en las fotografías aéreas; superponiendo los contornos magnéticos a las fotografías, es posible llenar los vacíos existentes en el control geológico. Aun en el caso de interpretaciones cualitativas, hay que tener en cuenta que una anomalía puede significar, o bien un relieve en la superficie del basamento. Las variaciones en la polarización de las rocas del basamento enterradas a 1.5 km o más, pueden dar por resultado anomalías hasta por varios miles de gammas.

### METODO GRAVIMETRICO

La gravimetría hace uso en la actualidad de un aparato que responde a las variaciones de la gravedad, aun cuando no pueda medir el valor en sí de la misma. Esto se obtiene midiendo los cambios minúsculos que se observan en el peso de una masa pequeña cuando es trasladada de un lugar a otro. Este aparato es muy sensible y básicamente es una balanza de resortes y recibe el nombre de gravímetro. Los gravímetros modernos han alcanzado, en condiciones adecuadas, lecturas del orden de 0.01 de miligal. La unidad cegesimal empleada para medir la fuerza del campo gravitacional es el Gal, llamado así en honor a Galileo y equivale a la aceleración de  $1 \text{ cm/seg}^2$ . El campo gravitacional de la tierra tiene un valor promedio de 980 gales, o sea  $980 \text{ cm/seg}^2$ . (8, pag 37).

Las pequeñas variaciones que pueden ser ocasionadas por causas geológicas, pertenecen a esta categoría de detectibilidad. Como se dijo anteriormente, ya que la gravedad no se puede medir con estos aparatos, los valores que se obtienen son referidos a un datum convencional. La obtención del valor absoluto de la gravedad no es necesario para efecto de encontrar los cambios de las condiciones geológicas del subsuelo, puesto que para ello son suficientes las variaciones de la gravedad. Naturalmente que si se desea hacer un mapa mostrando curvas de gravedad, un punto del levantamiento deberá estar referido a una estación en la cual se conozca el valor absoluto de la gravedad.

El gravímetro mide directamente pequeñas variaciones de la componente vertical de la gravedad; estas variaciones, como se dijo arriba,

son del orden de 0.1 miligal o menores.

La eficiencia del trabajo de campo, o sea el número de observaciones llevadas a cabo en un día de trabajo, está limitada en general por las distancias entre los puntos de observación y los medios de transporte disponibles. Los gravímetros pueden ser utilizados para trabajos en áreas pantanosas, así como en lugares desprovistos de caminos, ya que pueden ser instalados en vehículos de doble tracción que se desplazan fácilmente a campo traviesa.

En la interpretación de los resultados de una investigación gravimétrica hay que tomar en cuenta principalmente los siguientes factores: finalidad de la investigación, su precisión y cantidad de información geológica que se haya obtenido por otros medios o fuentes. A veces, las investigaciones gravimétricas se hacen con el objeto de llevar a cabo un reconocimiento previo, en estas circunstancias no es necesario efectuar un análisis complicado de los datos, pues el trabajo gravimétrico sirve simplemente para localizar sitios de interés, los cuales posteriormente serán investigados por otros métodos.

Una vez que los valores gravimétricos encontrados han sido corregidos según los factores mencionados anteriormente, se colocan en un plano o mapa y se procede a unir los de igual valor, obteniéndose curvas gravimétricas las cuales dan informaciones sobre la geología interna del subsuelo.

Para evitar conclusiones erróneas al interpretar las curvas gravimétricas, debe tomarse en cuenta que dichas curvas no son equivalentes a los contornos estructurales como los que se obtienen cuando -

se estudian una serie de perforaciones.

En la actualidad la mayor parte de las observaciones de la gravedad se hacen sobre el nivel del mar en una superficie que no es plana. Es necesario, pues, hacer las correcciones a la gravedad observada basándose en la topografía y deducir la gravedad que resulta en las condiciones artificiales si consideramos a la tierra como un esferoide perfectamente uniforme. Existen sistemas de tres correcciones, que son los siguientes: corrección de aire libre, corrección de Boyer y corrección topográfica.

#### CORRECCION DE AIRE LIBRE

La estación representada a una altitud  $h$  sobre el nivel del mar está a una distancia  $h$  más alejada del centro de la tierra que otra estación que estuviera al nivel del mar. Puesto que la masa de la tierra se puede considerar como concentrada en su centro, la ley de los cuadrados inversos nos dice que la atracción de la tierra a una altitud  $h$  será  $\frac{R^2}{(R+h)^2} g_0$ , en donde  $g_0$  es el valor de la gravedad al nivel del mar, y  $R$  el radio de la tierra. La diferencia de gravedad entre los dos niveles será

$$g_0 - \frac{R^2}{(R+h)^2} g_0 = g_0 \left[ 1 - \frac{R^2}{(R+h)^2} \right] = \frac{2g_0 hR + g_0 h^2}{(R+h)^2} = \frac{2g_0 h}{R}$$

puesto que  $h \ll R$ . Sustituyendo  $g_0$  por 980, y  $R$  por 6378 km llegamos a la corrección de 0,308 miligales/metro. Esto se denomina la corrección al aire libre por que no se tiene en cuenta la atracción de ningún material situado por encima del nivel del mar. Esta corrección se añade a la gravedad observada.



### CORRECCION DE BOUGUER

La corrección de Bouguer tiene en cuenta la atracción del material rocoso situado entre el nivel del mar y la estación situada a la altitud  $h$ . Se basa en la hipótesis de que la superficie de la Tierra es horizontal en todas partes (paralela al geode) a una distancia  $h$  por encima del nivel del mar. Las montañas que sobresalen de esta superficie horizontal imaginaria y los vallos que quedan por debajo falscan esta hipótesis, pero su efecto gravitatorio se compensa por la corrección topográfica subsiguiente. La atracción en miligales de una capa infinita de espesor  $h$  es  $2\pi\gamma h$ . Si  $\sigma$  se considera como  $2.67 \text{ g/cm}^3$  (la densidad media general de las rocas de la corteza); y  $\gamma$  es  $6670 \times 10^{-8}$  (constante gravitatoria universal), la corrección de Bouguer será  $0,111$  miligales/metro. Esta corrección se sustrae porque en realidad estamos eliminando el material situado entre el nivel del mar y el nivel de la estación.

Puesto que las dos correcciones anteriores son ambas proporcionales a la altitud sobre el nivel del mar, lo habitual es combinar las dos en una sencilla corrección de altitud de  $(0,308 - 0,111)h$  ó  $0,197h$  miligales, en la que  $h$  está en metros.

### CORRECCION TOPOGRAFICA

Esta corrección tiene en cuenta la atracción de las masas situadas por encima de la estación, y corrige también las depresiones situadas por debajo del nivel de la estación, que hacían incorrecta la hipótesis de Bouguer. Puesto que la atracción de las masas más altas se ejerce por encima de la estación y se opone a la gravedad,

se lo suma a la gravedad observada para anular su efecto. De la misma manera, la atracción del material que ocupa el valle inferior a la estación se debe restar a la corrección de Bouguer. Puesto que este material no existe realmente debemos sumar su atracción para compensar lo que fue sustraído al hacer la corrección de Bouguer. Por tanto, la corrección topográfica se suma siempre, tratándose de una montaña o de un valle.

#### ANOMALIAS

La diferencia entre el valor de la gravedad corregida y el valor teórico de la gravedad en el esferoide para la latitud y la longitud de la estación se denomina anomalía gravitatoria, que depende de la situación de la estación. El tipo de anomalía depende de las correcciones que se hayan hecho al valor observado. La anomalía de aire libre es,

$$\text{gravedad observada} + \text{corrección al aire libre} - \text{gravedad teórica}$$

Si la topografía sobre el nivel del mar fuera hueca (de modo que las correcciones de Bouguer y topográfica fueran cero) y si la tierra estuviera homogéneamente debajo del nivel del mar, la anomalía del aire libre sería cero.

Si se han aplicado las correcciones de aire libre, Bouguer y topográfica, la anomalía de Bouguer es:

$$\text{Grav. observada} + \text{correcc. al aire} - \text{correcc. de Bouguer} + \text{correcc. topograf.} - \text{grav. teórica}$$

Esta anomalía sería nula si la densidad de las rocas por debajo del nivel del mar variase con la profundidad exactamente lo mismo en -

todas partes. Una anomalía de Bouguer distinta de cero puede indicar un exceso o déficit de la densidad por debajo del nivel del mar, o puede indicar que la densidad real por encima del nivel del mar es distinta de la que se ha supuesto al elegir la constante para hacer la corrección de Bouguer.

### INSTRUMENTOS

En la prospección por gravedad se han utilizado tres tipos de instrumentos: la balanza de torsión, el péndulo y el gravímetro. El primero de estos, ideado en un principio con fines geodésicos hacia comienzos del presente siglo, fue ampliamente utilizado hasta 1935, aproximadamente. El péndulo tuvo un uso limitado para la exploración petrolífera hacia 1930 y el gravímetro, que ha desplazado a ambos, viene siendo utilizado casi exclusivamente desde entonces (8, pag 61).

Durante un largo período el desarrollo y los perfeccionamientos en los instrumentos para medir la gravedad progresaron con una rapidez espectacular, progreso que continuó hasta 1947-1950, aproximadamente, cuando se logró una precisión suficiente para satisfacer todas las exigencias normales de la labor exploratoria. Si se encuentra manera de poder poner en práctica una mayor precisión es seguramente posible que a ello sigan nuevos perfeccionamientos.

Las anomalías buscadas en la prospección, tales como las ocasionadas por crestas enterradas, tienen picos de valores que rara vez son mayores de 1 ó 2 miligales superpuestos a una aceleración normal gravitacional de cerca de un millón de miligales. Como nos interesan más las diferencias en la gravedad que los valores absolutos de

la misma, no son necesarios instrumentos que midan directamente la gravedad. En la actualidad, los mejores péndulos dan resultados - que apenas son de fiar en un miligal, y por lo tanto, las medidas obtenidas con el péndulo no pueden llegar a las diferencias de 0.1 miligales o menos, que, frecuentemente, son exigibles en la prospección por gravedad. El gravímetro no puede ser usado para determinar valores absolutos de la gravedad, pero mide pequeñas diferencias con una precisión del orden de 0.1 miligales.

Los datos proporcionados por el péndulo son necesarios para calibrar las lecturas del gravímetro que, fundamentalmente, registran el alargamiento de un resorte bajo la acción de la fuerza gravitacional.

Aunque hoy se usan casi universalmente instrumentos para la medida directa de diferencias de gravedad, la balanza, que mide gradientes y curvaturas en lugar de aceleraciones gravitatorias, tuvo mucho empleo hasta 1930; así también aunque en algunos trabajos se emplearon instrumentos pendulares en la actualidad prácticamente los métodos gravimétricos de exploración geofísica emplean casi exclusivamente el gravímetro.

El sistema elástico de un gravímetro consiste usualmente de un resorte de metal o cuerpo, hilos muy finos etc, los cuales poseen unas constantes muy altas de sus propiedades elásticas. A pesar de lo anterior sucede que para cada gravímetro es difícil alcanzar dichas constancias, teniendo como resultado el fenómeno llamado deriva o sea la variación del punto cero.

La deriva resulta del hecho de que aun bajo un valor estable de la gravedad y con otras condiciones externas (temperatura, presión atmosférica, acción de los campos magnéticos y eléctricos, ausencia de vibraciones microsísmicas de la tierra, etc.) suficientemente constantes, la deformación del sistema elástico del gravímetro es irreversible y cambia continuamente. Como resultado, las lecturas del gravímetro también continuamente varían lo cual, por consiguiente deberá ser corregido para la influencia de deriva. El instrumento es adecuado para las observaciones si la deriva es pequeña. El valor de la corrección por deriva es determinada de lecturas repetidas del instrumento en uno o varios puntos de observación. La precisión obtenida con el gravímetro depende considerablemente de la constancia de la proporción (variación lineal) de deriva. A fin de reducir el error debido a la falta de variación lineal de deriva, los circuitos corregidos en el campo no deberán exceder de 6 a 8 horas y con alguna pérdida de precisión, el período de las lecturas repetidas es alargado a uno o dos días. El efecto de deriva limita en cierto modo el campo de aplicación de los gravímetros y necesita el uso de medios más rápidos de transporte, siendo necesario en algunos casos extremos el transporte aéreo.

#### PROCEDIMIENTOS EN LAS OPERACIONES DE CAMPO Y SUS CORRECCIONES

A continuación se tratará solamente de la utilización y de las correcciones de los gravímetros, ya que ni la balanza de torsión ni el péndulo se utilizan hoy en proporción apreciable en la prospección gravimétrica.

Las diferencias de la fuerza gravitacional  $\Delta_g = (g_r)_2 - (g_r)_1$  de observaciones con gravímetro, son determinados en circuitos separados hechos entre puntos iniciales y puntos a ser establecidos, los valores observados de  $g_r$ , deberán ser reducidos por las correcciones instrumentales, incluyendo también la corrección por deriva. Para la determinación del cero de deriva durante un circuito, las observaciones iniciales y finales son efectuadas en el mismo punto. Las observaciones finales pueden también ser hechas en cualquier otro punto para el cual la diferencia de la fuerza gravitacional con respecto al punto inicial de observaciones es conocido con suficiente exactitud.

La duración del circuito, el número de puntos y la secuencia de su observación en el circuito, depende de muchas condiciones específicas de trabajo (precisión de mediciones, posibilidades técnicas del instrumento, valor y constancia de la razón del cero de deriva, el número de gravímetros usados simultáneamente en el circuito, densidad y localización de los puntos a ser determinadas, medios de transporte usados y la accesibilidad por caminos, condiciones climáticas, etc.) Además deberá tenerse en mente que debido a que el equipo es complejo y que hay un gran número de partes delicadas en el gravímetro, la precisión de las medidas de campo con frecuencia es diferente por varios instrumentos del mismo tipo y aun de la misma serie de producción y depende la influencia de las condiciones externas del trabajo (por ejemplo, cuando se tienen oscilaciones bruscas de temperatura, condiciones desfavorables de transportación, etc.) La duración usual o corriente de un circuito indivi-

duel no debe pesar de seis a ocho horas, siendo extendido únicamente bajo condiciones especiales, con la disminución respectiva en la precisión de las mediciones.

## MEDIDAS DE LA GRAVEDAD SOBRE EL TERRENO

### DETERMINACION DE LA SITUACION DE LAS ESTACIONES

Al proyectar un estudio gravimétrico, uno de los factores que hay que tener más en cuenta es la situación y espaciado de las estaciones. En un estudio de reconocimiento para grandes estructuras que puedan ser petrolíferas, la distancia entre las estaciones será, naturalmente, mucho más grande que en una investigación para localizar masas metálicas de tamaño reducido y más superficiales. El desarrollo reciente de los gravímetros fácilmente portables ha liberado a los medidores de la necesidad de situar las estaciones únicamente a lo largo de las carreteras o zonas accesibles a los camiones, aunque sigue siendo más y económico utilizar vehículos siempre que sea posible.

Con frecuencia es conveniente desplazar las estaciones de su posición teórica en una red uniforme, con objeto de evitar desigualdades topográficas que requerirían correcciones laboriosas y precisas, siempre que solamente se alejen del punto teórico unos 100 metros. Así por ejemplo, una lectura realizada en la cumbre de un pequeño cerro estará afectada mucho más por la masa del mismo cerro que si se hiciera a una pequeña distancia de sus laderas; en ambos casos habrá que realizar correcciones debidas al terreno, pero la incertidumbre en la forma exacta y en la densidad del pequeño cerro no aumentará mucho el error en el último caso.

## MÉTODOS ELÉCTRICOS

Actualmente en el estudio de los recursos geotérmicos, previo a la fase de perforación, el método de resistividad eléctrica es el que da información más directa.

En la prospección eléctrica se hace uso de las siguientes propiedades de las rocas: 1) Conductividad, la cual condiciona la cantidad de corriente que atraviesa una roca al aplicársele una diferencia de potencial; 2) La constante dieléctrica, que informa acerca de la capacidad de un material pétreo para almacenar una carga eléctrica.

La resistividad eléctrica de un material es numéricamente igual a la resistencia, expresada en ohmios, entre las caras opuestas de un cubo unidad de dicho material.

(9, pag 514). La intensidad  $I$  de la corriente en un conductor dado depende de la intensidad  $E$  del campo eléctrico en el conductor. Se puede definir una propiedad llamada resistividad  $\rho$ , como la razón de la intensidad del campo eléctrico a la intensidad de la corriente por unidad de sección transversal:

$$\rho = \frac{E}{I/A} \quad (1)$$

Sean  $V_a$  y  $V_b$  los potenciales en dos puntos de un conductor separados por una distancia  $L$ . La intensidad del campo eléctrico  $E$  en el conductor es igual al gradiente de potencial  $(V_a - V_b)/L$ . Por consiguiente la ecuación (1) se puede escribir:

$$\rho = \frac{V_a - V_b}{IL/A} \quad (2) \quad \text{ó sea} \quad I = \frac{V_a - V_b}{L/A} \quad (3)$$

La magnitud  $L/A$  se denomina resistencia  $R$  del conductor:



$$R = \frac{L}{A}$$

En función de la resistencia, la ecuación (3) se convierte:

$$I = \frac{V_a - V_b}{R} = \frac{V_{ab}}{R} \quad (5)$$

Si la densidad de la corriente por unidad de sección en un conductor es  $I$  directamente proporcional a  $E$ , su resistividad es constante y por consiguiente para un conductor de longitud  $L$  y sección  $A$  dadas, la resistencia  $R$  es también constante, o sea independiente de  $I$  y de  $E$ . Es decir, que para tal conductor, la intensidad  $I$  de la corriente es directamente proporcional a la diferencia de potencial  $V_{ab}$ .

Esta proporcionalidad directa fue descubierta experimentalmente por el físico alemán, Georg Simon Ohm y se conoce como la Ley de Ohm. De la ecuación  $R = V/I$  se deduce que la unidad de resistencia es el voltio por amperio, recibe el nombre de ohmio y se designa con la letra griega  $\Omega$ .

En el sistema MKS, en el cual la unidad de longitud es el metro y la unidad de superficie el  $m^2$ , la unidad de resistividad es el ohmio-metro. Si se utiliza el centímetro como unidad de longitud y el centímetro cuadrado como unidad de área, las resistividades se expresan en ohmios-centímetros.

La gama de resistencia de las rocas y materiales pétreos es amplia, pues se extiende desde  $10^{-3}$  hasta  $10^{17}$  ohmio-cm. Las rocas y minerales con resistividades comprendidas entre  $10^{-3}$  y  $10$  ohmios-cm se consideran como buenos conductores; de  $10^2$  a  $10^9$ , como conductores intermedios y de  $10^{10}$  a  $10^{17}$  como malos conductores.

En las formaciones sedimentarias porosas, como arenas, gravas, conglomerados, etc., la resistividad depende más del agua que lleva en los intersticios la formación que de la conductividad intrínseca del mismo material rocoso.

La actividad electroquímica de la composición química de las rocas, y también de la composición y concentración de los electrolitos disueltos en el agua del suelo, con los cuales está en contacto. De ello depende la magnitud y signo del voltaje generado cuando el material rocoso está en equilibrio con un electrolito.

La actividad electroquímica encuentra su aplicación práctica más importante en el registro de potenciales. Cuando una arena saturada de agua salada y una arcilla impermeable infrayacente son atravesadas por un pozo de sondeo lleno de un lodo de alta resistencia, se produce una fuerza electromotriz que tiene una magnitud  $K \frac{\rho_{m}}{\rho_w}$ , en donde  $\rho_m$  es la resistividad del lodo,  $\rho_w$  la resistividad del agua intersticial del lodo y  $K$  una constante que depende de la constitución de los sólidos diluidos en contacto. Naturalmente, si el lodo y el agua tienen la misma resistividad, no se produce potencial alguno.

#### Medidas de Resistividad

De acuerdo con la práctica normal, la resistividad eléctrica de una porción de terreno se mide de la siguiente manera: se colocan cuatro electrodos en línea recta (ver figura 3a). Los dos electrodos exteriores A y B se conectan en serie con una fuente de energía eléctrica (planta eléctrica o un juego de baterías) y un miliamperímetro; reciben el nombre de electrodos de corriente y consisten en barras de metal terminados en punta. Entre los electrodos interiores M y N

que reciben el nombre de electrodos de potencial, se conecta un potenciómetro para medir el voltaje. Para determinar la resistividad del terreno, se mide en el miliamperímetro la corriente  $I$  que fluye de la batería y que corre por el terreno entre los electrodos de corriente. Al mismo tiempo se mide con el potenciómetro el voltaje  $V$  entre los electrodos de potencial. La separación entre los electrodos de corriente y de potencial, que se mide en metros, se denomina  $a$ . De los valores obtenidos de  $I$ ,  $V$  y  $a$ , se puede hallar el valor de la resistividad de la roca o tierra comprendida entre los electrodos de corriente por la fórmula:  $\rho = 2 a \frac{V}{I}$ . La unidad de resistividad es el ohmio-metro.

El método de una resistividad se puede utilizar para medir: 1) la resistividad para distintas profundidades en un punto dado, ó 2) la resistividad en distintos puntos a lo largo de un perfil, para una profundidad determinada.

En el método 1, la distancia  $a$  entre electrodos se va aumentando progresivamente para determinar los cambios de resistividad con la profundidad. Al aumentar la distancia de  $a$  entre los electrodos, la corriente penetra a una mayor profundidad en función de  $a$ . Este procedimiento recibe el nombre de sondeo eléctrico. Tomando como base las resistividades medidas en el campo, se dibujan las curvas de resistividad en la siguiente forma: la resistividad en ohmios-metros - como abscisas y la separación de los electrodos  $a$ , como ordenada. (Fig. 3b).

En el método 2, los 4 electrodos se mantienen en distancia constante moviéndolos en conjunto, a lo largo de una línea recta y realizándo-

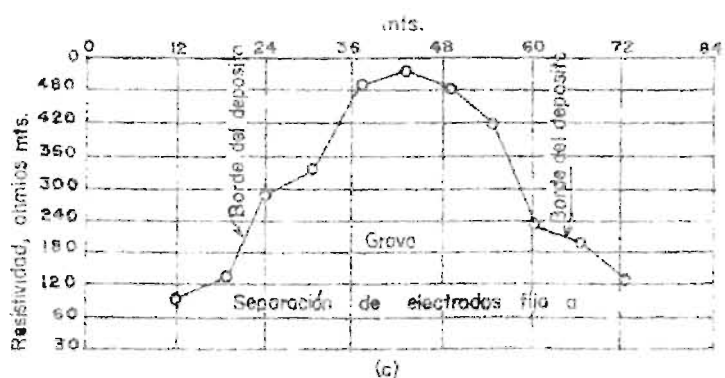
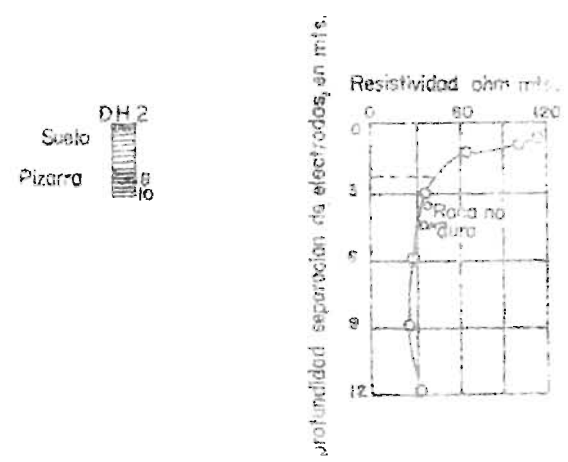
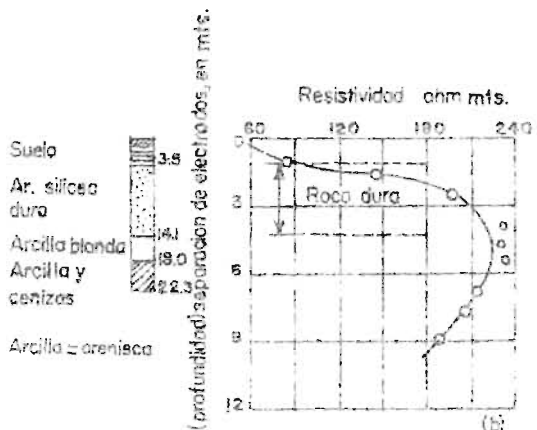
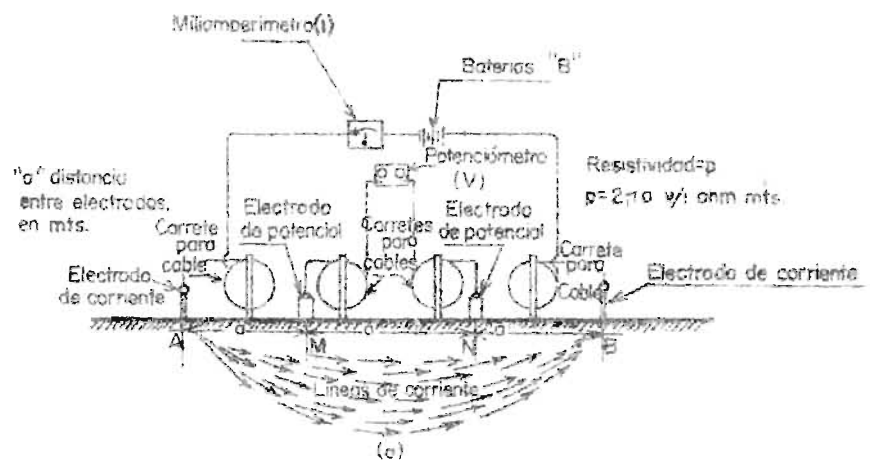


Fig. 3

se las medidas de resistividad en diferentes estaciones. En contras  
te con los cambios verticales de resistividad obtenidos con el mét  
do 1, en este se indican los cambios laterales. El método 2, se co-  
noce con el nombre de perfil continuo de resistividad. Las medidas  
en el campo se indican gráficamente como perfiles de resistividad.  
El estacionamiento se coloca sobre el eje de las abscisas y la re-  
sistividad ohmios-metro sobre el eje de las ordenadas (Fig 3c).

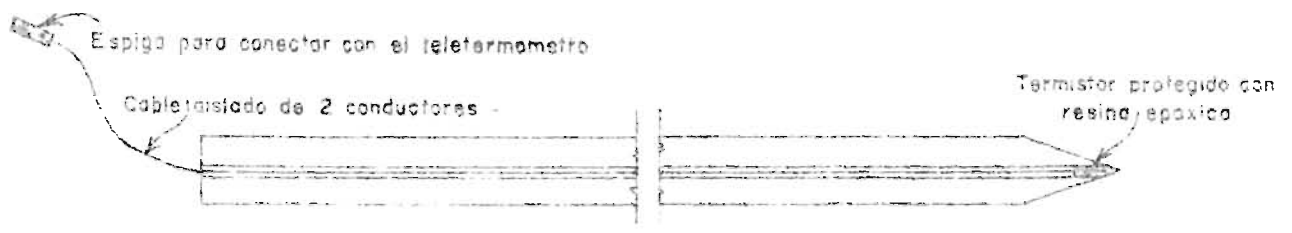
ANALISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LA INVESTIGACION

CAP I

GEOLOGIA

El área geotérmica de Ahuachapán presenta la mayor actividad geotérmica en la República y está localizada (una gran parte) en una zona ligada estrechamente al vulcanismo pleistocénico, tratándose por lo tanto de actividad postvolcánica. Presenta la ventaja que este tipo de vulcanismo tiene mucha actividad aun en el país y - por lo tanto puede mantener su energía para una explotación a largo plazo. Las condiciones geológicas parecen favorecer el desarrollo del proyecto puesto que el relleno joven de la fosa, constituido por productos sólidos principalmente, muy variables respecto a permeabilidad, a la vez que las intercalaciones de grandes coladas de lava fracturadas, permiten la circulación y formación de depósitos de vapor. Por otra parte las regiones inmediatas a los estratos volcánicos (zona de alimentación) aseguran la potencia de un acuífero permanente que circula a través de la fosa.

En forma general se conoce el área geotérmica Laguna Verde-Salitre San Lorenzo y parece haber una continuidad de la fuente de calor y su manifestación a través de fallas y fracturas, lo que está comprobado en parte por el gran número de manifestaciones geotermales en superficie (sondeos naturales) y por las perforaciones de sondeos de gradiente donde casi siempre se encontraron fuertes alteraciones de la roca y temperaturas con incremento mayor hacia la profundidad.



Corte Sonda de Madera

Fig. 4

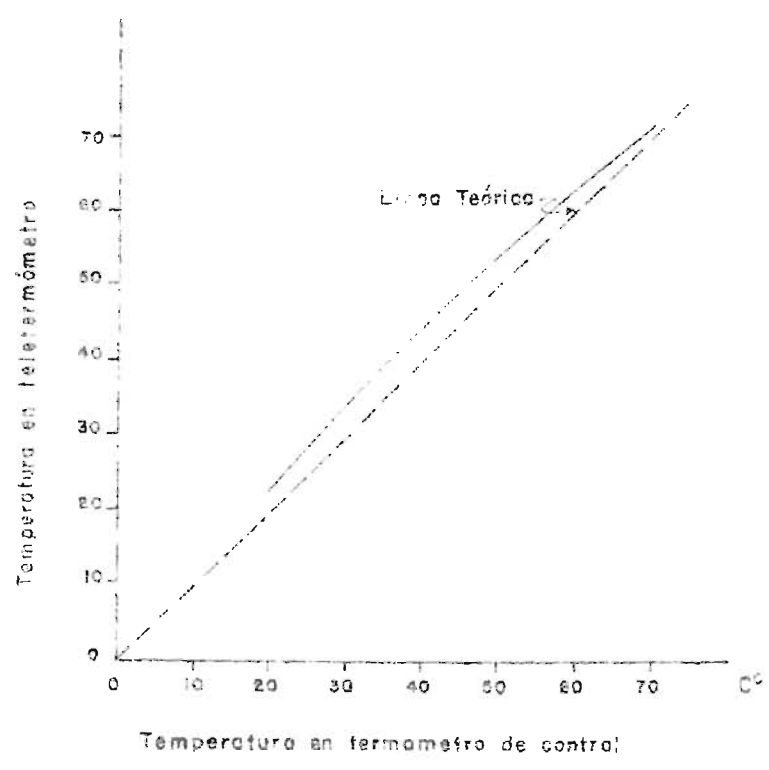


Fig. 5

Con respecto al área de Berlín y dada la posición de los campos termales se puede establecer que todos siguen en forma general una orientación NNW lo que hace suponer una línea de debilidad tectónica en el basamento pliocénico, extendida desde el cráter del Tacapa hasta las últimas manifestaciones activas del Río Caliente, campo termal Arcvalo y fuente termal Santa Anita. Esta línea puede prolongarse hasta las márgenes del río Lempa de acuerdo a indicios de descomposición termal a través de esta zona y algunas fuentes de agua a orillas de dicho río con temperaturas entre 46 y 78°C. La consideración referente a que se trata de una sola línea tectónica del basamento y que los vapores termales afloran no directamente sobre una sola línea, se interpreta así, como consecuencia de la falta de homogeneidad de las lavas agrietadas, las cuales -- permiten la salida de dichos vapores por puntos diversos. Hay posibilidad también que además de la línea de debilidad tectónica mencionada, existan fallas paralelas a través de la fuente Correa-El Bálsamo y del Tronadorcito. En cuanto a la zona de Sta. Rosa de Lima, se puede considerar dentro del grupo de zonas "cuyas manifestaciones no aparentan tener relación directa con vulcanismo reciente y están localizadas en campos volcánicos antiguos", es decir, en el grupo "b" (ver Capítulo Estudio Geológico) y como se ha podido ver por el análisis de sus constituyentes geológicos ninguno de ellos es de reciente formación, -- siendo su edad en términos generales y por la relación que guardan con las rocas Pleistocénicas de la fosa Central, del Plioceno, as-



to es, se trata de manifestaciones en un campo volcánico antiguo. Ahora bien, lo importante es analizar como funcionan geotérmicamente estas zonas hidrotermales. En campos hidrotermales de este tipo se pueden presentar en general dos casos: el primero, en que el agua meteórica superficial se infiltra hasta rocas volcánicas calientes relativamente cercanas a la superficie de las que toma calor ascendiendo nuevamente, formando así un sistema de convección. Debido en parte a la baja actividad térmica de estas rocas volcánicas, a la ausencia de una contribución magmática directa y al poco volumen de roca caliente accesible a las aguas filtrantes, estos campos no llegan a adquirir notables temperaturas y no pudiéndose por tanto en ocasiones utilizar su producción para la generación de electricidad. El segundo caso, menos común, es aquel en que un sistema de convección constituido en rocas con cierta permeabilidad, acarrea suficiente energía calorífica de la fuente de calor, para transmitirla únicamente por conducción (en rocas impermeables o de baja permeabilidad no hay convección en gran escala) a estratos superyacentes de baja permeabilidad, haciendo entrar en ebullición el agua superficial saturante, la que se manifestaría en la superficie en forma de manantial caliente o escape de vapor dependiendo es to de la magnitud de energía calorífica conducida y de la cantidad de agua superficial saturante; lo que puede juzgarse por el mismo tipo de manifestación (agua caliente o vapor); es decir, que si del estudio geológico resulta que las manifestaciones brotan a través de rocas impermeables, en forma de vapor o agua a alta temperatura (+ de 80°C), se puede pensar que en el subsuelo existe una importan-

ta fuente calorífica. Este tipo de campos por lo general llegan a ser de gran extensión, siendo buenos productores de vapor y ofreciendo perspectivas interesantes para su explotación en escala económica, para la generación de electricidad.

Desde luego su aprovechamiento dependerá de dos factores decisivos que se conocerán durante la investigación: un incremento anormal en el gradiente geotérmico a profundidad y la localización de un acuífero profundo que alimente la fuente de calor.

En términos generales y dentro del grupo "a" quedan clasificadas zonas hidrotermales como la del Volcán de San Vicente (en sus flancos) la del volcán de San Miguel (en su cráter), etc., dentro del grupo "b" se pueden clasificar zonas como la de Santa Rosa de Lima, la del Río Terola, etc. y dentro del grupo "c", las más importantes, como las de Ahuachapán (Agua Shuca, Playón de Ahuachapán, La Labor, etc.) Chinameca, Berlín, etc.

Ahora bien de los grupos "a" y "c" de los arriba citados, se localizan áreas hidrotermales dentro de la Fosa Tectónica Central (Graham) siendo las del grupo "c" las que presentan como se mencionó, una posibilidad más inmediata y segura para su explotación demostrada por el alto flujo calórico de sus manifestaciones y de los gradientes geotérmicos anormales (30 ó más veces el gradiente normal) que se obtienen en cualquier perforación exploratoria.

Por otro lado el grupo "b" es el que se presenta generalmente en las rocas Pliocénicas o Plio-Pleistocénicas del país y sin relación aparente superficial con vulcanismo reciente, pero ofreciendo en con-

traste posibilidades amplias de explotación.

### GEOQUIMICA

El laboratorio de la oficina Estudios Geotérmicos está preparado para analizar los siguientes componentes de aguas termales y gases sobre una base rutinaria.

Agua:  $\text{SiO}_2$  (Silice). Método colorimétrico con digestión alcalina

Na, K (Sodio y Potasio) Fotometría de llama.

Ca, Mg (Calcio y Magnesio) Titulación con EDTA

Cl (Cloruro) Titulación de Mohr

$\text{SO}_4$  (Sulfatos) Colorimetría-Cromato

F (Fluoruro) Colorimetría de Lamar modificada

$\text{CO}_3\text{H}$  etc. Titulación ácida

B (Boro) Colorimetría Carmin

PH y Conductividad

Gases:  $\text{SH}_2$  (Sulfuro de hidrógeno) Titulación Iodométrica con bureta Tutwiler.

$\text{CO}_2$  (Dióxido de carbono) Análisis Orsat

$\text{O}_2$  (Oxígeno) Análisis Orsat

$\text{H}_2$  (Hidrógeno) Análisis Orsat (Combustión fraccional en óxido de cobre)

$\text{CH}_4$  (Metano) Análisis Orsat (Combustión lenta)

$\text{N}_2 + \text{Ar}$  (Nitrógeno+Argón) Análisis Orsat por diferencia.

El equipo para muestreo de gases de la fumarola y manantiales calientes fue adaptado de partes obtenidas localmente. Actualmente cuentan con el equipo esencial de laboratorio químico para que el trabajo de Geoquímica en la primera fase del proyecto sea desarro--

llado en su totalidad.

El equipo esencial con que se cuenta para la realización de los análisis químicos es el siguiente:

Colorímetro espectrofotómetro (Bausch & Lomb)

Fotómetro de llama Coleman

pH meter (medidor portátil)

Conductímetro portátil

Equipo de destilación y desmineralización de agua

Horno de alta temperatura

Analizador de gases tipo Orsat y otros implementos indispensables en un laboratorio de este tipo.

Carácter Geoquímico de la actividad termal en El Salvador (10, pag. 3). La Geología de El Salvador está caracterizada por su racionte actividad volcánica. Una gran cantidad de material volcánico se ha acumulado a lo largo de una faja a través de la región en sentido Este-Oeste. La actividad termal está distribuida sobre la región completa, tanto sobre la zona de volcanes jóvenes como sobre la base terciaria.

Los tipos de bases terciarias pueden ser distinguidos: en la zona volcánica joven, áreas fumarólicas que descargan vapor y gases son encontradas en lugares altos con filtraciones de aguas termales salinas en elevaciones bajas, donde el nivel de agua corta la superficie del terreno. Sobre la fundación terciaria un gran número de fuentes calientes se presentan variando en temperatura desde ligera mente sobre la temperatura normal del agua superficial fría hasta la ebullición.

Comparando la actividad térmica superficial en El Salvador con las áreas geotérmicas en otras partes del mundo, la diferencia más grande es la ausencia de áreas de fuentes calientes con depósitos voluminosos de sílice y/o carbonato. Hay, por otra parte una cerrada similitud con la actividad térmica en Islandia en relación con los agrupamientos de áreas termales en campos fumarólicos asociados con estructura volcánicas jóvenes (áreas de alta temperatura) y áreas de manantiales calientes situadas en las fundaciones terciarias (áreas de baja temperatura).

Generalmente se considera ahora el que las aguas termales representan aguas meteóricas de circulación profunda, las cuales derivaron sus componentes químicos por filtraciones en canales de circulación en las paredes de las rocas. La composición química y la mineralogía de las paredes de las rocas pueden determinar la composición del agua. Las relaciones químicas entre las rocas y el agua están en gran parte gobernadas por los equilibrios en solución, los cuales dependen de la temperatura. El contacto entre aguas termales y rocas volcánicas en general dará como resultados composiciones químicas similares del agua a temperaturas similares, pero el contacto con rocas sedimentarias puede resultar en composiciones distintas, dependiendo del tipo de sedimento.

Los contornos geológicos y petrológicos son entonces de gran importancia cuando un estudio es hecho para llegar a una interpretación lógica de la química de las aguas termales.

Todas las rocas superficiales en El Salvador son volcánicas, oscilando entre las basálticas y las riolíticas. En los volcanes re-

cientes, las acumulaciones de cenizas riolíticas son muy prominentes y los taconamientos riolíticos y domos son frecuentemente originados en las basas terciarias. La mayoría de las rocas volcánicas son sin embargo, flujos de lava basálticos o andesíticos. La química del agua meteórica es un conocimiento necesario para la interpretación de la química de las aguas termales. Ninguna información sobre la química del agua y lluvia es obtenida en la oficina meteorológica de El Salvador, pero algunas muestras de aguas superficiales fueron analizadas. Estas aguas son relativamente altas en sólidos disueltos y especialmente ricas en sílice. Este es probablemente el resultado de las lixiviaciones tropicales efectivas de las capas superficiales donde la sílice es realmente obtenible en forma amorfa en las cenizas volcánicas. El extremadamente bajo contenido de cloruros pueden también ser explicado como el resultado de lixiviaciones tropicales, las cuales lavan afuera todo el cloruro obtenible en un corto tiempo, y el residuo no contribuye, por su pequeña cantidad de cloruros, a la percolación del agua terrestre.

La mayoría de diferencias aparentes en la química del gas entre los gases de El Salvador y los de Islandia y Nueva Zelandia son las cantidades relativamente bajas de componentes  $\text{SH}_2$  y  $\text{H}_2$ . Esto es compensado por una gran cantidad de  $\text{CO}_2$ .

Aunque no existen relaciones definidas o claras entre la química de los gases y la temperatura, parece que grandes cantidades de sulfuro de Hidrógeno y especialmente Hidrógeno, estén asociadas con altas temperaturas en el orden de 270-300°C.



Las cantidades relativamente bajas de estos componentes en los campos fumarólicos de El Salvador, pueden indicar que tales altas temperaturas no pueden ser encontradas, pero por otro lado se debe enfatizar que cada área termal tiene características geoquímicas propias, las cuales pueden dar una analogía de este tipo.

En estas conexiones debe recordarse que sedimentos calcáreos son probables de presentarse a profundidades en esas áreas termales. Lixivias de carbonatos pueden entonces ser la razón para el relativamente alto contenido de  $CO_2$ , enmascarando la presencia de otros componentes gaseosos activos. Las muestras obtenidas en El Salvador fueron obtenidas en condiciones de no-actividad, o en condiciones de quietud en comparación con las muestras de Islandia y Nueva Zelandia. Las muestras de El Salvador son escapes emitidos a distancias relativamente grandes de los principales campos fumarólicos, mientras que las muestras de Islandia y Nueva Zelandia son tomas de los agujeros de las perforaciones o de manantiales calientes, con altas descargas de agua de ebullición. Las muestras de El Salvador pueden entonces no mostrar la química tranquila de las aguas termales profundas.

Bajo todas las consideraciones hechas arriba, la interpretación de las muestras de El Salvador pueden ser de valor limitado. Ellas no contienen ningún componente que puede ser indicador de alta temperatura convincente y ellas contienen constantemente alto Magnesio, lo cual es considerado usualmente incompatible con la alta temperatura. Como se anota arriba, estas aguas no son probablemente representativas de las aguas termales profundas, debido a que antes de salir del reservorio profundo, ellas han pasado a través de una serie de compli

cadras reacciones químicas con las paredes de las rocas de canales de flujo frío.

Debido a las relativamente pocas fumarolas y manantiales calientes en las dos áreas de alta temperatura, los datos soportando cualquier interpretación química son necesariamente pocos. Lo que puede ser muestreado y analizado no da ninguna indicación obvia de altas temperaturas, tales como 250°C, las cuales son las temperaturas bases comunes para la producción en áreas termales. La química, sin embargo, indica temperaturas ligeramente arriba de 200°C.

Una característica importante que tienen en común todos los manantiales conocidos de agua caliente en la base terciaria, es el alto contenido de sulfatos.

La química de los manantiales de gases calientes es también idéntica en todos los casos observados. Esta cerrada similitud en la química de los manantiales de agua caliente y de gases calientes en localidades distantes, indican una base genética idéntica. La amplia distribución, y más o menos la misma distribución de los manantiales calientes, indican que los gradientes térmicos en las completas fundaciones terciarias es lo suficientemente alto para calentar todas las aguas terrestres profundas percoladas en el área y los grupos de manantiales calientes con más o menos composición química idéntica pueden ser considerados como el rebalse de un vasto lago de agua termal subyacente en la región.



### METODO GEOTERMICO

Los tipos de medidas se pusieron en práctica en nuestro país; medidas superficiales de temperatura y medidas de gradientes geotérmicos.

Las medidas superficiales de temperatura fueron hechas utilizando teletermómetros marca "Yellow Spring Instrument" (YSI), con un equipo de tres sondas, con termistores de la misma marca, calibrados para 2340 $\Omega$  a 25°C. Después de las pruebas preliminares en la zona del Playón de Ahuachapán, se encontró que el tiempo de estabilización de las sondas era de 10 minutos aproximadamente; en otras palabras para que la lectura observada en el cuadrante del teletermómetro se mantuviera fija era necesario esperar 10 minutos.

Con el propósito de facilitar la introducción de las sondas en los agujeros, se colocaron los termistores en varillas de madera de 2 mts. de longitud y 22 milímetros de diámetro. Las varillas fueron cubiertas con una película de resina epóxica con dos propósitos: 1) Preservarlas de la humedad y 2) proporcionar una capa de protección al termistor para asegurar la impermeabilidad y hermetismo necesario a fin de impedir corto-circuitos. Este último es el aspecto más importante en el uso de la resina. Como información adicional se tiene la siguiente experiencia obtenida en 1959 en Ahuachapán por el Dr. Kappel Meyer, autor de este método: se protegieron con cubos de bronce los extremos donde se encontraban los termistores; pero la cubierta metálica, además de aumentar el tiempo de estabilización absorbía parte del calor circundante, lo cual alteraba los datos proporcionados por el teletermómetro.

Cuando por circunstancias especiales haya que usar termistores de características diferentes a las especificadas para determinados telotermómetros, será necesario elaborar la curva de corrección correspondiente (por ejemplo 3000  $\Omega$  ó 10.000  $\Omega$ ). Dicha curva se obtiene mediante la calibración del termistor. En los estudios llevados a la práctica por la Oficina de Recursos Geotérmicos, tal calibración se ha hecho en el laboratorio de la siguiente manera: en un depósito se calienta agua desde la temperatura ambiente hasta que se alcanza la temperatura deseada (por ej. 100°C); el baño tiene un termostato que sirve para mantener constante la temperatura, así como una pequeña hélice con el objeto de agitar el agua y asegurar la uniformidad de la temperatura en toda la masa de agua. Un termostato calibrado sirve para controlar la temperatura del baño. Media vez alcanzada la temperatura que servirá de prueba para el termistor, se introduce en el agua la punta de la varilla donde se encuentra el termistor, y después de 10 minutos, que es el tiempo necesario para la estabilización, se lee la temperatura que marca el telotermómetro, el cual previamente ha sido conectado por medio de una espiga en el otro extremo de la varilla. (Figura 4.-).

En la Figura 5 se muestra la relación que ordinariamente se encuentra entre las temperaturas marcadas en el termómetro de control del baño y el telotermómetro.

Las medidas realizadas en la práctica, fueron hechas en agujeros de 1.50 metros de profundidad por 25 milímetros de diámetro, perforados con anterioridad usando barrenos manuales. Los agujeros fueron espaciados a 15 metros de distancia y a lo largo de líneas que formaban parte de cuadrículas ya establecidas por medios topo-

gráficos.

Para las medidas de gradientes geotérmicos se hace uso de un --  
Puente de Wheatstone, como se mencionó anteriormente. Estas medidi  
das se obtienen de pozos de 100 mts. de profundidad aproximadamente  
te.

En febrero de 1967 el Profesor A.E. Beck, del Canadá, calibró 2  
termistores patrones contrastándolos con el del equipo de la Universidad  
de Western Ontario, Canadá, a fin de tenerlos como referancia  
para las distintas sondas empleadas en el Proyecto; esto -  
implicaba el empleo de puentes de mayor precisión que los existentes  
en el laboratorio de Estudios Geotérmicos.

El Profesor Beck elaboró las tablas correspondientes para las correcciones  
necesarias tomando en cuenta la resistencia propia de -  
los conductores en 100 mts. de longitud. Esta es la profundidad utilizada  
normalmente en las perforaciones para investigación de -  
gradientes.

#### METODO MAGNETICO

En algunos países la prospección magnética ha servido para enfocar  
o localizar fuentes de calor, ya que, debido a la acción del  $H_2S$  -  
la alteración hidrotermal de la magnetita causa la formación de pirita  
que es no magnética; por consiguiente, cuando son observadas  
variaciones en la intensidad magnetométrica, uno debe tener en mente  
te que es de interés conocer el decrecimiento de los valores magnéti  
cos de los estratos hidrotermales, ya que ellos indican el origen de  
la actividad hidrotermal (8, pag 205).

Deseario examinar hasta que punto podría aplicarse el método magnético para descubrir fallas vaporíferas, haciendo las consideraciones anteriores, Dúrr (1955) y Stober (1956) realizaron mediciones de la intensidad vertical en el Playón de Ahuachapán y Agua Shuca, utilizando una balanza magnética vertical tipo Schmidt marca Askania; sin embargo, las mediciones en toda esta área, de acuerdo a los informes de dichos autores, solamente mostraron una variación máxima de 75 gammas, sin demostrar ninguna relación con las condiciones geológicas o tectónicas. Los autores explicaban este resultado aduciendo que el subsuelo de toda la zona cuenta con un sistema de convección de aguas termales lo que llevó a alteraciones litológicas no solamente a lo largo de las fallas que sirven como caminos principales para el agua termal o vapor, sino por más o menos toda la zona concluyendo que las condiciones magnéticas verticales no dan indicios de la situación de las fallas vaporíferas.

En base a estos resultados fue que inicialmente no se consideró en el plan de operaciones del Proyecto el método magnético en la exploración del Campo de Ahuachapán. Sin embargo, y a pedimento del Director del Proyecto, Dr. D.G. Fallen Bailey, cuando vino en Marzo de 1966 el consultor geofísico Dr. Palmason, trajo consigo un magnetómetro portátil del tipo discriminador del flujo (Flux-gate magnetometer) marca J. Sharpe Model MF-1 a fin de probar la posibilidad de los levantamientos magnéticos en las áreas termales de El Salvador.

Con este propósito se hicieron mediciones en las áreas de Playón de Salitre, La Labor, El Sauce, Agua Shuca y Playón de Ahuachapán,

alcanzando los perfiles de intensidad vertical un total de 24 km. con mediciones cada 50 m y en ciertas áreas críticas se acortó el intervalo a los 25 mts. Las variaciones del campo magnético vertical mostraron valores de aproximadamente 1000 gammas en contraste con los Doctores Dürr y Stober; ya que precisamente estos valores fueron alcanzados en la zona por ellos estudiada, Playón de Ahuachapán-Agua Shuco. Aparte del "ruido" proveniente de rocas cercanas a la superficie, estas variaciones parecen ser de dos clases: primeramente, un decrecimiento gradual del campo magnético vertical del área de Salitre a las áreas fumarólicas del Sur, este decrecimiento es del orden de 500 a 600 gammas; en segundo lugar, varias anomalías negativas fueron observadas en la parte sur del área; estas podrían estar relacionadas a la actividad termal, ya sea directamente a través de la destrucción de minerales magnéticos, o indirectamente a través de la falta de homogeneidad en la estructura geológica.

En base a los resultados antes mencionados parecía enteramente factible realizar levantamientos magnéticos en el Campo de Ahuachapán; estimándose necesario efectuar estas mediciones a lo largo de la red general del Proyecto y con espaciamientos cada 50 mts. Con este fin se adquirió en junio de 1966 un magnetómetro del tipo discriminador de flujo (Flux-gate) Mopher Modelo M700 con el cual se llevaron a cabo las mediciones de intensidad vertical proyectadas para todo el campo de Ahuachapán; los resultados obtenidos son mostrados en los mapas de isonómas correspondientes.

### METODO GRAVIMETRICO

Utilizando el parámetro de la densidad de las rocas y sus poquenísimas variaciones podemos aplicar el método gravimétrico en la exploración geofísica de un campo geotérmico, especialmente en cuanto a los rasgos tectónicos de la zona; que en nuestro caso particular de Ahuachapán debido a la complejidad superficial es de esperar que esta clase de mediciones contribuyan a esclarecer los problemas sobre la configuración del área (8, Pag. 199).

Previo a las labores del plan de operaciones del Proyecto del Fondo Especial antes mencionado, el Dr. Fritz Dürr del Servicio Geológico Nacional estimó necesario buscar en la gravimetría la ayuda necesaria a fin de localizar una falla principal supuestamente orientada en el sentido N-NE en el Playón de Salitre, con este propósito y logrando la amplia colaboración de la Dirección General de Cartografía y el Servicio Geodésico Interamericano, se midieron en 1962 cuatro perfiles gravimétricos que a continuación se describen.

### Control Horizontal y Vertical

Tal como fue especificado en el Proyecto elaborado por el Inter American Geodetic Survey, fueron trazadas 4 líneas (perfiles) normales a la dirección de la falla supuesta; tanto en lo horizontal como en lo vertical se emplearon métodos para asegurar un cierre de 3er. orden para levantamientos geodésicos. Cada una de las líneas medía 5 km. de largo, con un espaciamiento entre ellas de 1 km. Se establecieron estaciones cada 50 metros a lo largo de dicha línea, a fin de obtener una densidad de control acorde a las exi-

gencias del proyecto.

Las poligonales fueron amarradas a estaciones de triangulación de 2º orden y los niveles se apoyaron en B.M. de las líneas de 1er. orden que cruzan el área estudiada.

#### Observaciones Gravimétricas

Las observaciones y cálculos se realizaron bajo la supervisión - del Ingeniero Roman Geller Jr., del Inter American Geodetic Survey, habiéndose distribuido las operaciones de campo en tal forma que el Ingeniero Geller observó las líneas A y C además del amarrado con punto "A" de la red establecida en 1958 por el Ing. Julio Monges Calderas, del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.) así como los amarres de los - extremos de las 4 líneas; habiéndole correspondido al Ing. José González de la Dirección General de Cartografía de El Salvador -- las líneas B y D.

Las mediciones se hicieron usando el gravímetro Worden Nº 32, con una constante de: .4004 (4) por división, habiéndose empleado únicamente el círculo pequeño.

A fin de regular el cálculo de las correcciones por "deriva", se dividió cada línea en 10 secciones de 10 estaciones cada una con el objeto de tener un máximo de 2 horas entre las observaciones de los extremos de cada sección, tomando como base el tiempo medio - necesario para recorrer a pié la distancia correspondiente, ya que por ser esta la época de lluvia y el terreno un tanto accidentado, se imponía esta limitación. ●

Se efectuaron como mínimo tres lecturas en cada estación, que debían de coincidir dentro de 0.1 de división, a fin de obtener los cierres deseados, es decir .05 mgl. entre circuitos de secciones y .4 mgl. entre ( $\Sigma \Delta g$ ) de secciones y el ( $\Delta g$ ) observado entre los extremos de las líneas.

Los resultados finales fueron los siguientes:

Cierre de 40 circuitos de 10 estaciones cada uno;

mínimo: 0.00 mgl.

Máximo: 0.04 "

Cierre de línea:

Mínimo: 0.00 mgl

Máximo: 0.17 "

Las fórmulas y constantes empleadas en los cálculos fueron las siguientes:

Aceleración de la gravedad al nivel del mar según la fórmula Internacional:

$$g = 978.0490 (1 + 0.0052884 \sin^2 \phi - 0.0000059 \sin^2 2\phi)$$

Corrección por aire libre: + 0.3086 h

Bouguer: -0.04185  $\delta$  h

Adoptando un valor de  $\delta = 2.2$  (según Servicio Geológico Nacional) tenemos la siguiente constante para el cálculo de las correcciones Aire Libre Bouguer.

Aire Libre - Bouguer: + 0.2165 h.

La interpretación de dicho levantamiento fue ejecutado por la División de Geofísica del Servicio Geodésico Interamericano, habiéndose hecho las siguientes consideraciones:



a) Idealmente un perfil gravimétrico debería representar el efecto en la superficie de una distribución de masas en el subsuelo. Si el material es homogéneo, puede entonces no haber ningún reflejo de estructura en el lineamiento superficial de la gravedad. Únicamente cuando existen cuerpos adyacentes con contraste de gravedad, puede obtenerse alguna idea de su forma y distribución por medio de observaciones de la gravedad. Un valor relativo más alto en la superficie indicará un exceso de masa subterránea y un valor menor, o "baja", a lo largo del perfil corregido indicará un déficit de masa.

b) En el caso del área geotermal "Salitre", es probable que un basamento subyacente de basalto relativamente más pesado esté cubierto por varios centenares de metros de material eruptivo volcánico más liviano. La estructura, o desplazamiento vertical de la capa de basalto puede esperarse que modifique el lineamiento de la gravedad en la superficie. Un vacío relativo tal como una fisura, respiradero o zona brechada, estará indicada como una baja gravimétrica. Tales estructuras a una profundidad de varios centenares de metros producirán una anomalía superficial de un ancho correspondiente, debido a la atenuación de la variación de la gravedad con respecto a la distancia vertical. Coladas de lava podrán producir también o modificar las anomalías gravimétricas.

c) Debido a que la gravedad disminuye con la elevación, un perfil de valores gravimétricos observados en la superficie corresponderán grandemente al perfil topográfico y obscurecerán las indicaciones -

de la estructura subterránea. También el contacto aire-superficie es por si mismo un contraste de densidad y la masa de relieve topográfico causa un efecto oscurecedor similar.

d) Conociendo la elevación de cada estación, y seleccionando la densidad apropiada, los valores de gravedad observados pueden ser corregidos para incluir únicamente las variaciones de gravedad causadas por estructuras del subsuelo.

e) Los perfiles corregidos, o perfiles Bouguer, calculados con una densidad estimada inicial de 2.2, mostraron una correspondencia negativa a la topografía o sea una sobre compensación. Los perfiles fueron recalculados usando densidades 1.8, 2.0 y 2.56 adoptándose el valor de 1.8 como el más apropiado para el problema estudiado.

f) Para una mejor representación gráfica, se aplicó una corrección lineal arbitraria, que en efecto los inclinan más parejamente horizontal y paralelamente. Aunque las tendencias regionales pueden ser oscurecidas, la correlación entre los perfiles sería más obvia; y

g) Todos los valores de anomalía Bouguer para el área son negativos. Los valores corregidos fueron ploteados "aumentando hacia arriba", o en orden de un valor negativo decreciente, de modo que una anomalía positiva indicaría un exceso de masa del subsuelo.

Tomando como base los resultados obtenidos en esta primera fase de los levantamientos gravimétricos se preparó en 1966 como parte del plan de operaciones del Proyecto una serie de estaciones que cu--

briera el área estudiada a lo largo de la red general proyectada - para el campo geotérmico de Ahuachapán, con observaciones cada 200 mts. en los puntos pre-establecidos con dicha finalidad. Tanto en lo horizontal como en lo vertical se apoyaron los poligonales correspondientes en los levantamientos anteriores realizados por la Dirección General de Cartografía; el instrumento empleado fue un gravímetro prestado por el Inter American Geodetic Survey por medio de la Dirección General de Cartografía. El aparato era el Worden Nº 397 -- con una constante de 0.3710 (3) por división al igual que en levantamiento de 1962 antes mencionado fue utilizado únicamente el Dial pequeño haciéndose por lo menos tres lecturas con diferencia máxima entre sí de 0.1 de división; la duración de los circuitos fue de unas 4 horas ya que las características de "deriva" del instrumento lo permitían; se apoyó todo el levantamiento al igual que en el de 1962 en la estación llamada Punto "A" en la red nacional establecida en 1958 por el Ing. Julio Monge Caldera ligado por el Ing. González G. a las estaciones "Oficina Atiquizaya" y la "Capilla", para hacer este último enlace hubo necesidad de "reescalar" el instrumento para poder cubrir el rango de las mediciones en las estaciones que presentaban variaciones de elevación entre los 500 y 1,300 mts.

Una fase del procesamiento de los datos para obtener las anomalías Bouguer se hizo en la Dirección General de Cartografía utilizando las facilidades del computador electrónico IBM 1620 y empleando un programa especialmente elaborado en el Departamento de Cálculo de dicha Dirección, ya que el volumen de operaciones comprendidas para obtener los resultados provenientes del empleo de diversos factores de densi

dad para 1100 estaciones comprendidas en la red ya ejecutada, justifica el empleo de un computador electrónico.

Con el objetivo de tener una indicación preliminar de como se manifiesta el sistema de fallas mostrado en los levantamientos geológicos anteriores previos a la operación del Proyecto, se calculó aisladamente un factor de densidad de 1.8 ya que al hacer la evaluación de los datos del levantamiento de 1962 se llegó a la conclusión de que -por lo menos para la zona de estas líneas- esto es el valor más adecuado. Estos perfiles han mostrado una serie de anomalías - correlacionadas que nos indicarían fallas en los Rios Agua Caliente, Frío y Tehuapa.

#### METODO ELECTRICO

Entre los métodos geofísicos, el de resistividad eléctrica es el - considerado como medio más directo hasta hoy desarrollado para determinar áreas promisorias de producción de energía geotérmica. (8, Pag 198).

En la exploración geofísica del campo de Ahuachapán, fue aplicado el método. Con esta finalidad fue adquirido por el Proyecto, un equipo para mediciones de resistividad y potencial natural marca J. Sharpe Modelo SP5-R. Las primeras pruebas fueron realizadas en el Playón de Salitre y La Labor en abril de 1966; estos trabajos fueron ejecutados bajo la dirección del Dr. Gudmundur Pálmason del State - Electricity Authority Department of Natural Heat, Reykjavik, Islandia, quien vino a nuestro país como consultor Geofísico por parte - de las Naciones Unidas. Desde las primeras mediciones se mostró claramente que el rango del instrumento era insuficiente para medir las

"bajas resistividades" que se encontraban en la zona; los valores de las resistividades superficiales parecen estar entre el rango de 10 a 50 ohmios, en áreas donde no es visible ninguna actividad térmica superficial. Debido a efectos de actividad termal es de esperarse que este valor sea decrecido hasta un rango de 1 a 5 ohmios o aún de un orden mucho menor. A fin de medir valores tan bajos de la resistividad es necesario que dicho equipo sea capaz de medir valores de resistencia (o sea la relación del voltaje a corriente) tan bajos como 0.001 ohmios; siendo el límite inferior del modelo Sharpe antes mencionado de apenas 0.1 ohmios resultaba imposible realizar las mediciones necesarias con dicho instrumento. Se trató de resolver este problema modificando la fuente de corriente, aumentándose por medio de baterías secas de 45 voltios dispuestos en serie, y utilizando el microvoltímetro de la parte del instrumento para potencial natural -y con razonable cuidado- fue posible medir los dos perfiles del Playón de Salitre. Todas estas mediciones fueron hechas con la disposición de electrodos del sistema Wenner con una separación máxima de electrodos de corriente de 216 mts. y se utilizaron las curvas características calculadas en el Amt für Bodenforschung, Hannover. Pero aun con esta modificación -más bien experimental- se encontró que era muy difícil ya en la práctica poder realizar normalmente y con la celeridad necesaria el programa de mediciones de resistividad en el campo de Ahuechápán. Por estas razones se buscaron nuevos tipos de instrumentos capaces de llenar las condiciones exigidas por los valores de instrumentos capaces de llenar las condiciones exigidas por los valores

de instrumentos capaces de llenar las condiciones exigidas por los valores bajísimos de resistividad presentes en las áreas de actividad termal. Finalmente se ordenó un equipo de resistividad eléctrica a la McPhar Geophysics Limited de Ontario, Canada, con un alto poder de penetración y capaz de medir estos valores bajos y poder así contar con la información básica necesaria para completar el cuadro de las características geofísicas del campo.

## PERFORACION DE POZOS

La perforación de pozos data de épocas remotas. Las referencias más antiguas de que se tiene conocimiento se remontan a la antigua civilización china unos 250 años AC. los chinos utilizaron el sistema de percusión para la perforación de pozos de agua por medio de máquinas primitivas hechas de madera. Básicamente el sistema se mantuvo por siglos, sin cambios sustanciales, hasta mediados del Siglo XIX, cuando se perforó por primera vez un pozo de petróleo. Este hecho vino a cambiar radicalmente los métodos de perforación. El método de percusión funciona perfectamente en terrenos duros, pero en terrenos arcillosos y arenosos causa problemas porque la vibración y el impacto del percusor ocasiona derrumbes en las paredes del pozo.

Perforación por Percusión. El método de perforación por percusión puede compararse al empleado por un cortador de rocas para hacer un hoyo a través de una baldosa de roca. Por la percusión que resulta de golpear un cincel con un martillo, el cortador va cincelando el hueco en el pozo. El vástago y los percusores del equipo de cable conducen el barrenado, que tiene la forma de cincel, dentro de la formación para que, cincelando en cada golpe, se consiga la penetración en las formaciones.

El más antiguo de los tipos es el que dispone de un balancín, barras compensadoras y una unidad motriz. Aún se encuentra en uso en ciertas regiones.

El equipo de percusión portátil puede conseguir perforaciones hasta de 2000 metros o aún más. Otro de los empleos de este equipo es

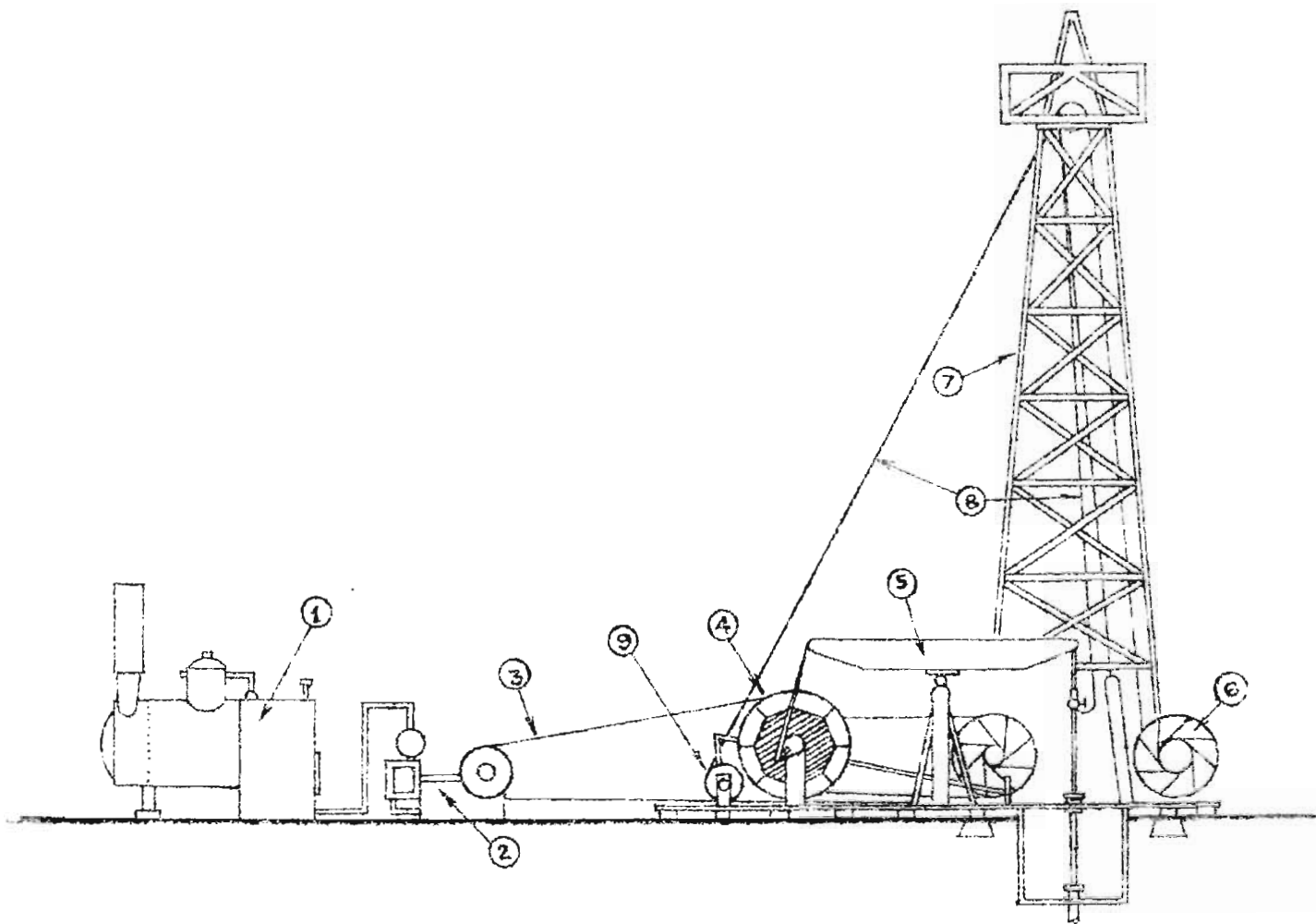


Fig. 6

COMPONENTES DE UN EQUIPO DE PERFORACION POR PERCUSION

- 1 Fuente de potencia
- 2 Maquina motriz
- 3 Transmision
- 4 Volante
- 5 Sistemas de balancin
- 6 Tambor del cable
- 7 Torre
- 8 Cable de perforacion
- 9 Tambor auxiliar



la limpieza del fondo de los pozos perforados.

Para la extracción de los detritos del fondo del pozo, se suspende el movimiento del percusor y se introduce una cuchara que recoge el material suelto y lo lleva a la superficie; después de haber limpiado el pozo se reanuda la operación (figura 4).

La sonda rotatoria. La sonda rotatoria fue usada inicialmente en terrenos arcillosos, en lugar de la sonda a percusión debido a que esta última ocasiona, como se dijo anteriormente, derrumbes y cavidades en la pared del pozo. Al principio se creyó que la sonda rotatoria solamente serviría en terrenos suaves, pero hoy en día su uso se ha extendido a toda clase de terrenos gracias a la fabricación de barrenos de gran dureza (10, Pag.85).

Los componentes principales que forman el equipo de perforación son los siguientes: barreno, la columna de perforación (barra de perforación, tubería de perforación), el cuadrante (Kelly), unión giratoria, aparejo, la torre y el sistema de lodos (Fig. 5).

Barrenos. El barreno constituye el instrumento penetrador de la roca que se perfora. Según la naturaleza del terreno, varía el tipo de barreno a utilizar. En primer lugar tenemos el llamado tipo "a cola de pez" (fishtail bit) el cual se utiliza para atravesar formaciones blandas: arcillas, arenas, etc. por su gran rapidez de avance. No sirve para las formaciones duras o abrasivas pues se desgasta rápidamente, ni para terrenos fracturados, que pueden por impacto ocasionar su rotura.

El barreno existe en varias formas. Antiguamente era del tipo "cola de pez", planchón de acero forjado por el herrero. Tipos seme--

# ESQUEMA DEL SISTEMA DE LODO

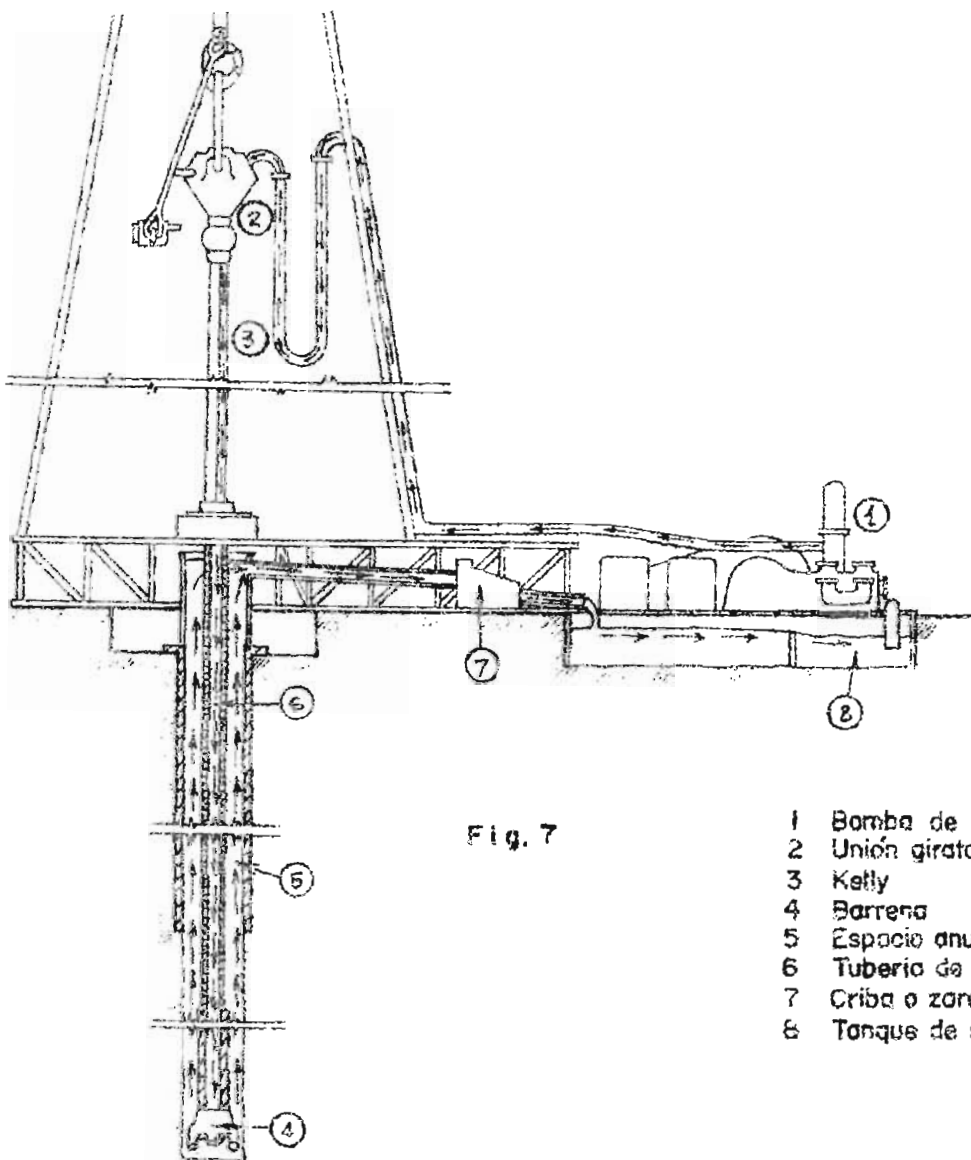


Fig. 7

- 1 Bomba de lodo
- 2 Unión giratoria
- 3 Kelly
- 4 Barrena
- 5 Espacio anular, ascenso del lodo
- 6 Tubería de perforación, descenso del lodo
- 7 Criba o zaranda
- 8 Tanque de succión

jantes modernos son de tres o cuatro palas, reforzado con metal de extrema dureza.

La mayoría de los barrenos empleados hoy son de dos o tres rodillos (o conos) con dientes duros y agudos. Los conos rotan en ejes equipados con cojinetes de rodillos y de bolas para disminuir la fricción.

Todas las barrenas son enroscadas para conectarse al vástago de perforación y tienen canales para encausar los chorros de fluido de perforación hacia el punto de contacto entre la formación y el barrenno.

Para penetrar formaciones de resistencia alta, como granito por ejemplo, se emplean mucho los barrenos reforzados con diamantes industriales. Cientos de diamantes van incrustados en un material matriz especial extremadamente duro que les mantiene en su lugar al recibir el impacto de la roca que se está perforando.

Los elementos cortantes (fresas, rodillos o conos) desalojan los rípios de roca o suelo mediante una acción combinada de molino, martillo y cincel, rotando a la vez, impulsados por la columna de perforación.

El American Petroleum Institute prescribe el diámetro del barrenno a usar según el diámetro de la tubería de revestimiento, no permitiendo en ningún caso que el espacio libre entre el barrenno y la tubería sea menor de  $\frac{1}{16}$ ".

El barrenno que se utiliza en terrenos blandos debe tener dientes grandes que permitan un avance rápido y que no se empasten en terrenos arcillosos; su espaciamiento debe ser tal que cada diente caiga

en el espacio no tocado por el cono precedente, asegurando así una constante penetración y disgregación del material. Este barrenno se usa en general a poca presión y alta velocidad.

En los barrenos para terrenos duros, los dientes de los conos son menores, para facilitar la trituración de la roca; cuando además los terrenos son fracturados, se aconseja usar un barrenno en el cual el ángulo de ataque de los dientes sea obtuso, con objeto de evitar su rotura.

En estos terrenos es aconsejable usar una velocidad baja de rotación y una presión alta. Al atravesar formaciones rocosas abrasivas, es recomendable también comprobar frecuentemente el diámetro del barrenno cambiándolo cuando se haya reducido mucho, para evitar dificultades al revestir el pozo.

Columna de Perforación. La columna de perforación comprende las barras pesadas de perforación y las tuberías de perforación. En el extremo inferior de las barras se encuentra el barrenno y en el extremo superior las tuberías. (Fig. 5).

Las funciones principales de la columna de perforación son: 1) - sostener y girar el barrenno. 2) conducir fluido de perforación - de la superficie al barrenno en el fondo del pozo. 3) bajar y subir el barrenno.

Las barras de perforación son huecas y de paredes muy gruesas. - Se emplean para suministrar peso encima del barrenno y de esta manera aumentar su capacidad para cortar el terreno. La longitud de cada barra es normalmente de 9 mts. y el número empleado por pozo llega a veces hasta 40.

La Tubería de Perforación está unida en su parte inferior con las barras de perforación y la parte superior con la barra cuadrada o Kelly. Se fabrican en 3 rangos:

Rango A de 18 a 22 pies

" B de 27 a 30 "

" C de 38 a 45 "

siendo el Rango C el más común en la actualidad.

El Cuadrante o Barra Kelly. El cuadrante, barra cuadrada o barra Kelly, es una barra hueca de sección cuadrada o hexagonal; está unida en la parte inferior a la tubería de perforación y en su extremo superior a la cabeza de inyección o unión giratoria; su longitud varía entre 40 y 60 pies. Tiene 3 funciones principales: 1) Sirve para suspender la columna de perforación. 2) Hace que la columna gire. 3) Conduce el fluido de perforación dentro de la columna.

La sección cuadrada o hexagonal de la barra kelly pasa libremente hacia arriba o abajo a través de una abertura en la mesa rotatoria. La mesa rotatoria recibe por medio de una corona dentada la potencia transmitida por el árbol de transmisión de un motor. A su vez la mesa rotatoria hace que la barra Kelly gire, rotando a la vez la columna de perforación.

La Unión Giratoria o Cabeza de Inyección. Suspendida de un gancho la unión giratoria realiza 3 funciones a saber: 1) soportar la barra Kelly y la columna de perforación. 2) permitir la rotación libre de las mismas. 3) asegurar la circulación del fluido de perfo-

ración o lodo que llega de la bomba, dentro de la columna de perforación.

A causa de los grandes esfuerzos y presiones a que se somete, se comprende que debe ser un mecanismo de precisión. Su elemento -- principal lo constituye el cojinete de alta capacidad, ya que debe soportar toda la columna de perforación.

Aparejo o Polipasto. El aparejo consta de un bloque fijo de 5 a 6 poleas, de un bloque móvil y del cable que lo acciona. El bloque fijo está colocado en la parte superior de la torre y transmite a ésta la carga que depende del gancho (unión giratoria), su propio peso, el del bloque móvil y el del cable. Las poleas deben tener un diámetro grande para evitar el desgaste del cable. El cable es de alambre de acero de  $1\frac{1}{4}$ " a  $1\frac{1}{2}$ " de diámetro y de 600 a 1200 mts. de longitud.

Torre de Perforación. La torre de perforación puede decirse que sólo tiene una función: proporcionar soporte al aparejo o polipasto. Este, a su vez, sostiene, sube y baja la columna de perforación. Su altura puede ser de 50 mts., suministra espacio para sacar tubería hasta de 30 mts. de longitud.

Sistema de Lodos. El barreno y la columna de perforación se han diseñado para conducir lodo (o fluido de perforación) de la superficie hasta el fondo del pozo. Este fluido regresa a la superficie a través del espacio anular que rodea la columna de perforación. La circulación del fluido, la cual continúa siempre que se está perforando el pozo, suministra enfriamiento, limpieza y, en cier-

to grado, lubricación al barreno. La circulación del fluido es la clave del sistema de perforación rotatoria.

Al comenzar la perforación, el fluido de perforación puede componerse de agua. A medida que el barreno va moliendo el suelo y soltando ripios en el agua, ésta se convierte en lodo o barro.

Ya que el bombeo del lodo de circulación es en circuito cerrado, hay que seleccionar un punto de partida para iniciar la discusión. Es conveniente empezar con el tanque de succión.

Al comenzar la perforación, el tanque se llena de agua (a veces mezclada con pequeña cantidad de bentonita). La conexión de succión de la bomba (generalmente una manguera de unos 8" de diámetro) permite el paso del fluido dentro de las cámaras de la bomba. Impulsado por ésta, el lodo pasa a través del tubo parado y la manguera, para llegar a la unión giratoria. De allí se encauza a través del cuadrante y la columna de perforación para limpiar la barrena y acarrear los ripios. Su curso hacia la superficie es a través del espacio anular ya referido. Al salir del pozo, el lodo se encauza a través de un tubo conductor por una criba (que saca los ripios) a un tanque o una fosa de asentamiento o decantación. Aquí se detiene un rato para que asienten la arena y los otros materiales granulares. Luego regresa al tanque de succión.

Perforación Una vez escogido el sitio de la perforación, es necesario asegurarse del abastecimiento de agua, pues en ciertos momentos se necesitan grandes cantidades de la misma, sobre todo al tener pérdidas de la circulación y durante la cimentación.

Solucionando el problema del agua e instalada la torre, es conveniente comprobar que se tienen las piezas de recambio necesarias y el material de consumo: bentonita, barrenos, camisas y empaques para la bomba de fangos, grasa y aceite, piezas de recambio para los motores, manómetros, correctivos químicos para el fango, etc. De la misma manera debe reunirse con anticipación todo el material que se usará dentro del pozo: tuberías de revestimiento, cemento y válvulas de seguridad y de compuerta comunes, etc.

Estas cosas revisten gran importancia en países como el nuestro, pues no se encuentran en plaza los materiales para este tipo de actividad. De no tomar todas las precauciones, se corre el riesgo de que por un pequeño desperfecto se pierdan semanas y aún meses de trabajo.

Para iniciar propiamente la perforación en primer lugar se hace un pozo de unos 4 mts. de prof. y de 1 metro de lado, de forma cuadrada; en seguida, con un barreno generalmente de 24" de diámetro, se perfora hasta unos 20 metros de profundidad. Este pozo se reviste inmediatamente con tubo de acero de 20" de diámetro, el cual se cementa introduciendo lechada de cemento en el espacio que queda entre el tubo y la pared del pozo. Para este trabajo se usa generalmente cemento de fraguado rápido (11, Pag. 85).

Después de 24 horas puede reanudarse la perforación. La parte inferior del pozo se ha llenado de cemento que es necesario perforar. Se recomienda hacerlo circulando agua en vez de fango a fin de no contaminar éste.



La segunda tubería se coloca a unos 80 metros de profundidad. Esta es una simple estimación; la profundidad en cada caso se determina según el espesor de la capa vegetal y de los estratos más o menos alterados. Para un sondeo de 500 a 1000 metros es suficiente reves tir el pozo hasta aquí con tubería de  $\phi$  16". Con el progreso de la técnica de perforación, se ha abandonado la antigua costumbre de - cambiar el diámetro de la tubería cada vez que haya una pérdida de la circulación o un incidente cualquiera. La tubería de revesti-- miento tendrá una válvula construida de plástico, la cual permite la salida del fango y del cemento, pero no su entrada. Una vez co- locada y fijada por medio de cuñas la mesa rotatoria, se baja la - tubería de perforación. Previamente, en la parte superior de la tu- bería, se ha atornillado, un cabezal que cierra herméticamente el espacio comprendido entre el barrono y la tubería.

Para preparar el cemento se usan mezcladoras a chorro, capaces de mezclar 1 m<sup>3</sup> por minuto o más.

La presión de la bomba de fangos obliga al cemento a descender -- dentro de las tuberías y luego llenar el espacio comprendido en-- tre la tubería y el terreno. Cuando el cemento ha llenado todo es- te espacio y comienza a salir, se suspende el bombeo de cemento y se bombea fango, calculando que desaloje el cemento que esté aún a dentro de la tubería. En seguida se extrae ésta y se deja reposar al pozo el tiempo necesario para que fragüe el cemento empleado, el cual se recomienda que sea del tipo rápido, se desecha el fango con taminado, que se sustituye con fango nuevo; se lavan cuidadosamente la tubería, la bomba del fango y la tubería que hayan entrado en - contacto con el cemento.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El área de Ahuachapán es indudablemente, el campo en que las investigaciones efectuadas hasta el momento muestra más claramente su potencialidad energética. El campo de huachapán está formado por varias zonas con manifestaciones de gran importancia entre -- las cuales se pueden mencionar, Río Agua Caliente, El Salitre, La Labor, Playa de Ahuachapán y Agua Shuca.

Tal como se mencionó en el capítulo respectivo cada una de las zonas termales anteriormente citadas puede clasificarse por su modo de manifestarse y su relación con las rocas que la constituyen en el grupo "c" o sea, aquellas cuyas intensas manifestaciones están íntimamente ligadas con zonas volcánicas recientes y activas. Este tipo de campos por su misma constitución geológica y porque generalmente han estado sometidos a un intenso tectonismo, presentan estructuras bastante complejas siendo por consiguiente complicado definir un programa de explotación previo sin contar con levantamientos geológicos y geofísicos que permitan la estructura -- del subsuelo y los sitios apropiados para realizar perforaciones. Los métodos de prospección geofísica debidamente elegidos y aplicados, sirven para evaluar la energía disponible y para seleccionar los lugares adecuados para la perforación. Es necesario proceder con mucha cautela en la selección de los métodos y en su aplicación, pues la obtención de datos erróneos podría tener como consecuencia desperdicio de capital.

Hasta la fecha se han perforado cinco pozos profundos en el país: El Tronador 1, Zona de Berlín; Parras Lempa 1, margen derecha del

Río Uempa, Km.86 Carretera Panamericana; y en la zona de Ahuachapán: Playón 1, Chipilapa 1 y Salitre 1. Todos los pozos permanecerán en vías de investigación por un año aproximadamente.

Es recomendable la perforación de otros pozos en las zonas donde se encuentran los pozos arriba mencionados, para completar los estudios y obtener una idea más clara de la capacidad y extensión de los depósitos de vapor.

## BIBLIOGRAFIA

- 1- MARTINEZ A., HECTOR Métodos para la evaluación de los coeficientes hidráulicos de acuíferos. Tesis profesional (1966), Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.
- 2- SEEGER, D. Influencia de la geología regional en la hidrología. Anales del Servicio Geológico Nacional de El Salvador. Boletín N° 4 (1957)
- 3- SERVICIO GEOLOGICO NACIONAL Energía Geotérmica, Informe N° 1 (1960) Ministerio de O.O.P.P., El Salvador.
- 4- ALONSO E., H. Exploración geotérmica preliminar en las zonas hidrotermales al oriente de la República de El Salvador (1966)
- 5- JIMENEZ., M. Informe sobre levantamiento geológico en el área de Ahuachapán (1967) Oficina de Estudios Geotérmicos.
- 6- Informe preliminar sobre Geología, Geohidrología y Geotérmica de la zona de Berlín (1966) Oficina Estudios Geotérmicos.
- 7- NUEVAS FUENTES DE ENERGIA Y APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA Publicación de las Naciones Unidas (1962) E/3577/Rev.1 - ST/ECA/72
- 8- GONZALEZ G., José La geofísica en El Salvador. Su aplicación en los estudios del campo geotérmico de Ahuachapán. Tesis Profesional (1966) Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.
- 9- SEARS, F.W.; ZEMANSKY, M.W. Física General, Edit. Aguilar, Madrid (1957).
- 10- FUNDAMENTOS DE PERFORACION Publicación de Petroleum Extension Service y Universidad de Texas (1961)
- 11- MARTINEZ, N.S. Perforación para vapores termales. Tesis profesional (1956) Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.



CEL	G N U
ESTUDIOS GEOLÓGICOS	
UBICACION FOCOS GRADIENTE	
ZONA DE AMBUQUELETA	
CURVAS ISOGRADIENTE	
NO. ESCALA	1:50,000
NO. PLAN	P-23-A-403

Este mapa muestra las curvas isogradas de los focos de gradiente en la zona de Ambuqueleta, Valles de la Luna y Valles de la Vieja. Las curvas isogradas están trazadas a intervalos de 100 metros. El mapa también muestra el relieve topográfico, las drenajes y las localidades de Anqueleta y Ambuqueleta.

Escala: 1:50,000  
 Proyección: UTM  
 Datum: WGS 84  
 Fuente de Datos: M. N. G.

Autor: M. N. G.  
 Año: 1980



EL 1980 N°1  
 EL 1980 N°2  
 LOS GALINOS

LAGUNA DEL LLANO

SAN SALVADOR

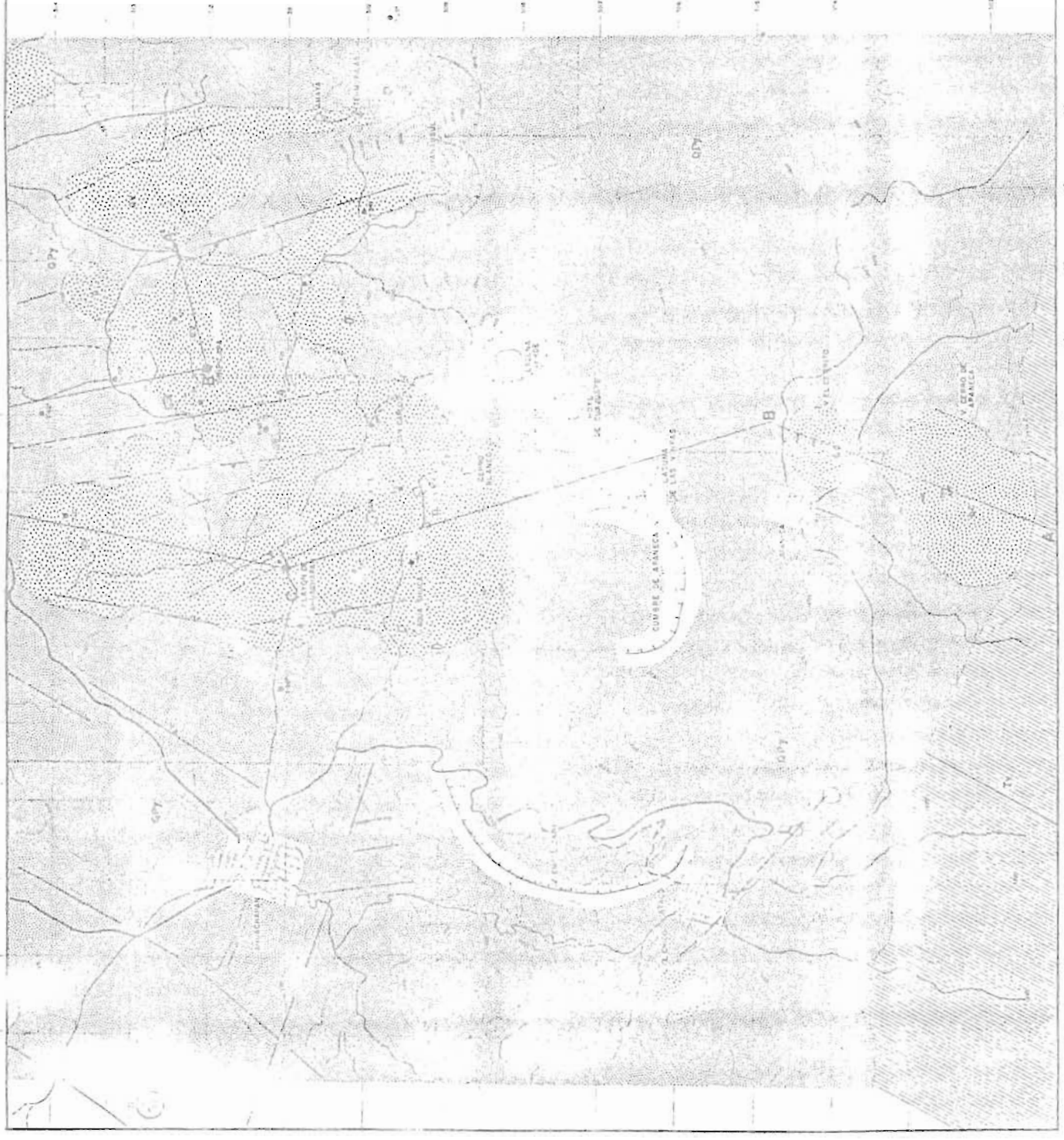
OP7

OP7

C E L U N

ESTUDIOS GEOTERMICOS  
 MAPA GEOLOGICO DEL AREA  
 GEOTERMICA DE AHUACHAPAN  
 HOJA 2 DE 3

JAN. SALVADOR 73-2-67 P-23-6-61



**LEYENDA**

	LINEAS DE NIVEL (TOPOGRAFIA)
	CAMINO TERRESTRE (ASfaltado)
	FERROVIARIA
	RIO
	CAJONCILLO
	LAGO
	BARRIO DE LA BARRICA
	FALLA
	FRONTERA
	PLEISTOCENO A RECIENTE
	CUATERNARIO
	PLIOCENO
	MIOCENO
	PALEOCENO
	EOCENO
	OLIGOCENO
	PALEOGENO
	NEOGENO
	CUATERNARIO
	PLEISTOCENO
	RECIENTE
	LINEAS DE NIVEL (TOPOGRAFIA)
	CAMINO TERRESTRE (ASfaltado)
	FERROVIARIA
	RIO
	CAJONCILLO
	LAGO
	BARRIO DE LA BARRICA
	FALLA
	FRONTERA
	PLEISTOCENO A RECIENTE
	CUATERNARIO
	PLIOCENO
	MIOCENO
	EOCENO
	OLIGOCENO
	PALEOGENO
	NEOGENO
	CUATERNARIO
	PLEISTOCENO
	RECIENTE

**C E L**  
**J N U**

ESTUDIOS GEOTERMICOS

MAPA GEOLOGICO DEL AREA  
 GEOTERMICA DE AHUACHICAN

NO. 1 DE 1

NO. 1 DE 1

NO. 1 DE 1

C E L    O N U

ESTUDIOS GEOTERMICOS

MAPA GEOLOGICO DEL AREA  
GEOTERMICA DE AHUACHAPAN

NO. 1 A DE 5

1958

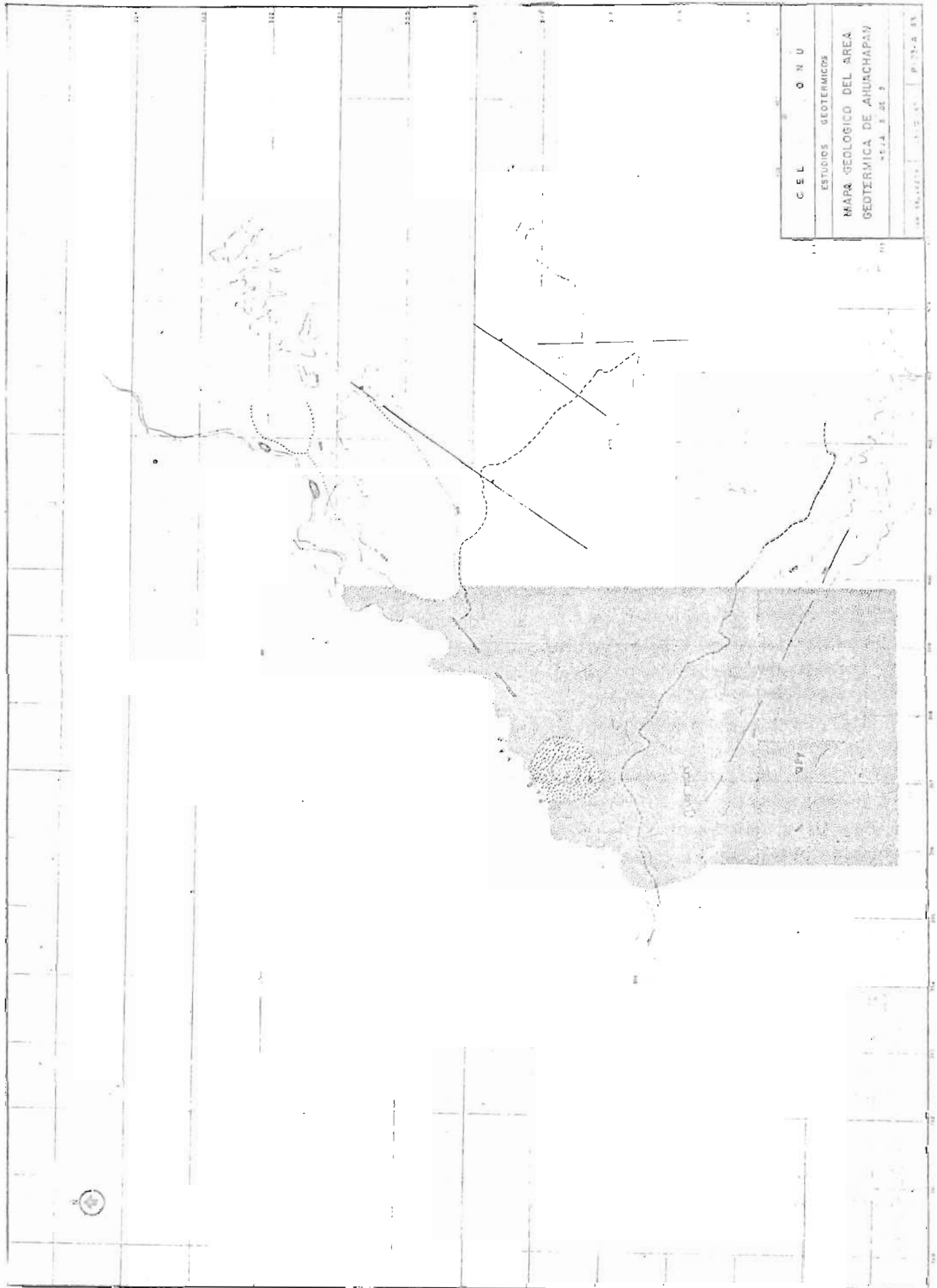




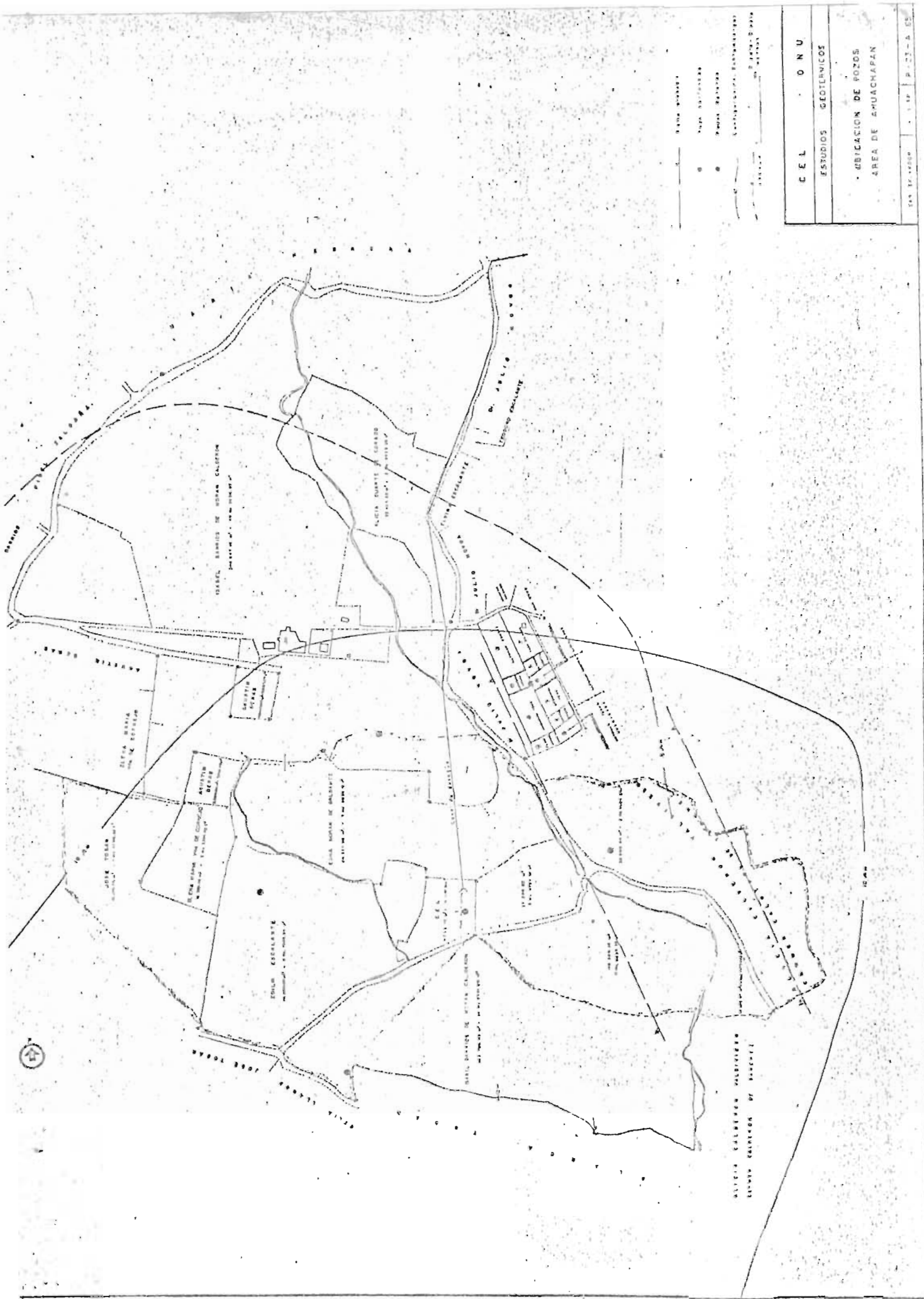
Fig. - 1



CEL ONU  
ESTUDIOS GEOTECNICOS  
VARIACIONES DE LA INTENSIDAD  
MAGNETICA VERTICAL  
1977 DE ARGENTINA  
EN ESCALA 1:50,000

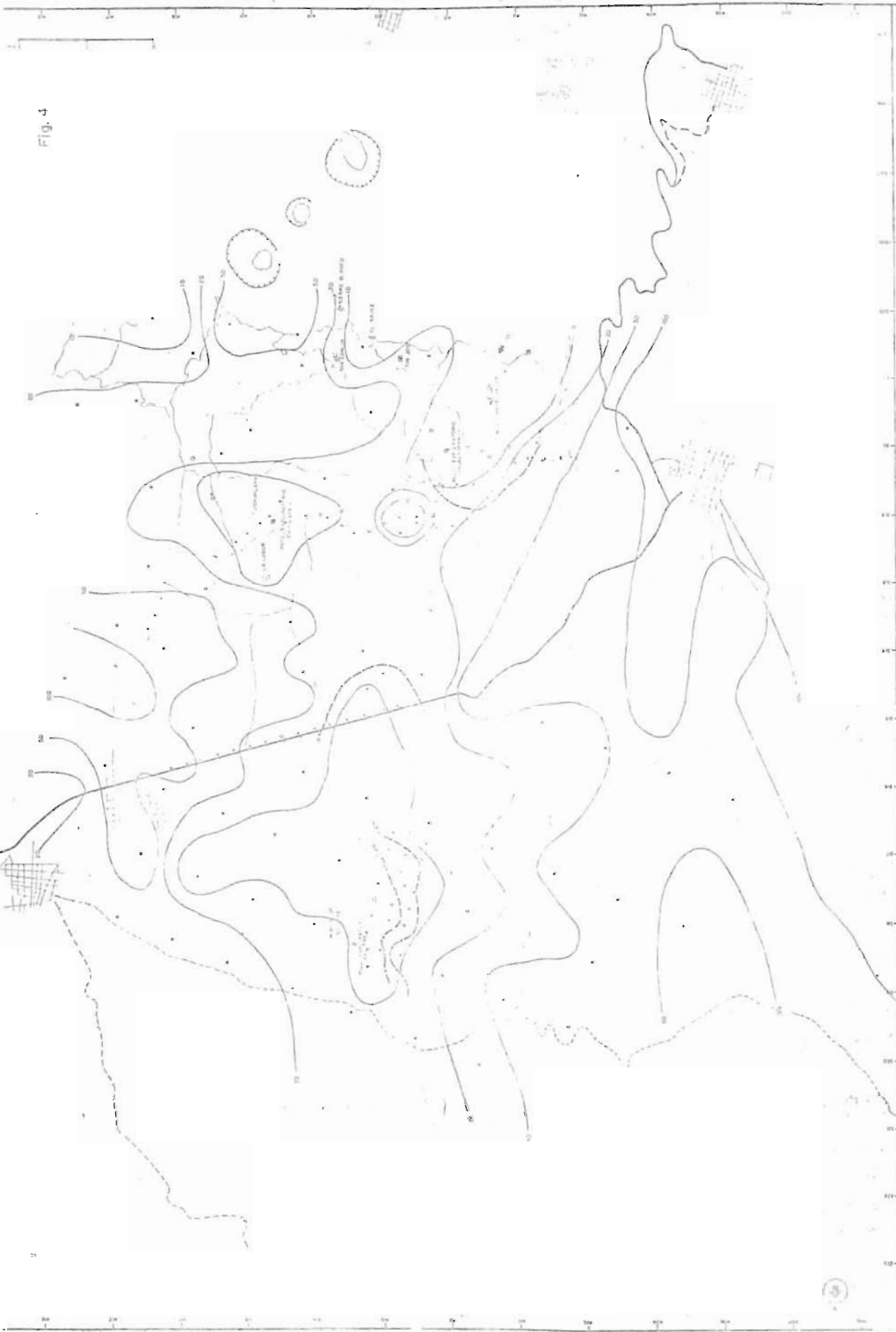
27  
MAY 1977  
MAY 1977





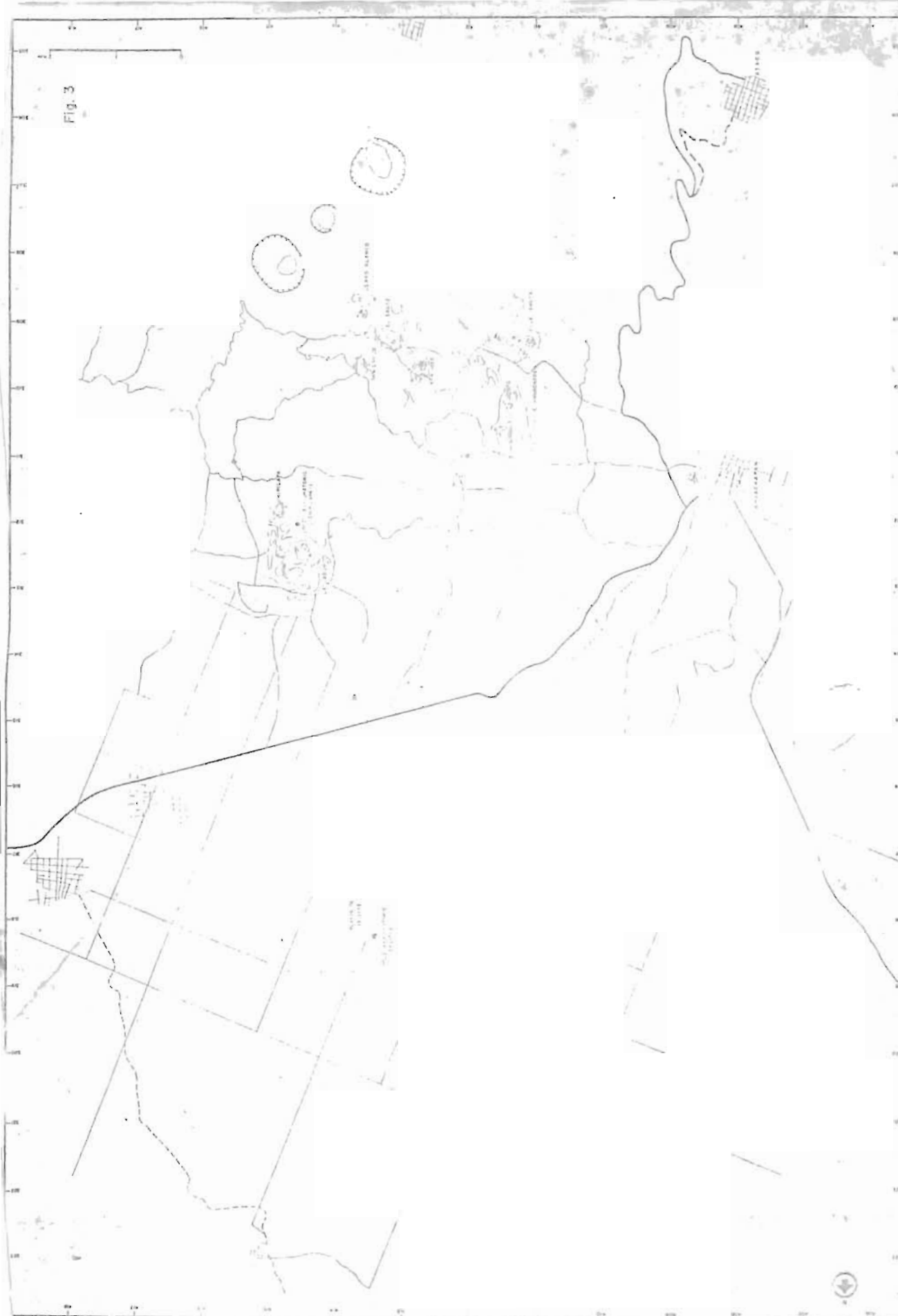
CEEL	ONU
ESTUDIOS GEOTECNICOS	
UBICACION DE POZOS	
AREA DE AMUACHAPAN	

Fig. 4



CELL		D. N. U.	
1. 2503			
LEP. 107-107		1. 100000	
<p>* STRENGTH MEMBER AREA UNDER CENTER OF GRAVITY (IN INTERIOR OF HULL) (CONSTRUCTION OF HULL) (SEE PLAN 107-107)</p> <p>* HULLS (CONSTRUCTION OF HULL) (CONSTRUCTION OF HULL) (CONSTRUCTION OF HULL)</p> <p>○ HULLS (CONSTRUCTION OF HULL) (CONSTRUCTION OF HULL) (CONSTRUCTION OF HULL)</p> <p>○ HULLS (CONSTRUCTION OF HULL) (CONSTRUCTION OF HULL) (CONSTRUCTION OF HULL)</p> <p>○ HULLS (CONSTRUCTION OF HULL) (CONSTRUCTION OF HULL) (CONSTRUCTION OF HULL)</p>			

Fig. 3



C E L O N U  
ESTUDIOS GEOTERMICOS  
ISOTERMAS A 1.5 m DE PROFUNDIDAD  
AREA DE ANUACHAPAN