

RO-200

(2901)

ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA (OLADE)
SEMINARIO LATINOAMERICANO SOBRE EXPLORACION GEOTERMICA
QUITO - ECUADOR
5-9 de Septiembre de 1983

"ESTADO ACTUAL DE LA GEOTERMIA EN AMERICA LATINA"
SINTESIS POR PAISES Y TRABAJOS TECNICOS

Auspicio de: Banco Interamericano de Desarrollo (BID)
Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL)

INDICE

	Pág.
Prólogo	5
1. INTRODUCCION	9
1.1 Conclusiones y Recomendaciones del Seminario	11
1.1.1 Actualización de la metodología de las etapas de reconoci- miento y prefactibilidad	11
1.1.2 Metodología sobre la estimación de potencial geotérmico. . .	12
1.1.3 Financiamiento de proyectos	13
1.1.4 Capacitación de Recursos Humanos	14
1.1.5 Aspectos Institucionales	15
2. SINTESIS POR PAISES	17
2.1 Bolivia	19
2.2 Colombia	25
2.3 Colombia - Ecuador (Proyecto Binacional)	31
2.4 Costa Rica	37
2.5 Chile	45
2.6 Ecuador	55
2.7 El Salvador	65
2.8 Guatemala	73
2.9 Haití	101
2.10 Honduras	105
2.11 México	111
2.12 Nicaragua	115
2.13 Panamá	129
2.14 Perú	135
2.15 República Dominicana	141
2.16 Venezuela	161
3. TRABAJOS TECNICOS PRESENTADOS POR LOS CONFERENCISTAS	167
3.1 Geovulcanología	
3.1.1 La Vulcanología en la Exploración Geotérmica; Franco Bar- beri (Universidad de Pisa - Italia)	169
3.2 Geoquímica	
3.2.1 La Geoquímica en la Exploración y Producción Geotérmica; Roberto O. Fournier (Servicio Geológico de los Estados Unidos)	183
3.3 Hidrogeología	
3.3.1 Métodos hidrogeológicos aplicados a la exploración geotér- mica; Paul Witherspoon (Universidad de Berkeley, Estados Unidos)	193
3.4 Geofísica	
3.4.1 La Geofísica en la Exploración Geotérmica; Compañía Ge- neral de Geofísica; Albert Duprat (Compañía General de Geofísica, Francia)	195
3.5 Evaluación de Potencial	
3.5.1 Evaluación de los Recursos Geotérmicos en Estados Unidos; Patrick Muffler (Servicio Geológico de los Estados Unidos) .	235
3.5.2 Aplicación de la Ingeniería de Yacimientos (Reservorios) en la Evaluación de un Campo Geotérmico; Jesús Rivera Rodríguez (Universidad Nacional Autónoma de México) . . .	249
4. LISTA DE PARTICIPANTES	255

PROLOGO

Dentro de un año prodigo en realizaciones para OLADE, el Seminario Latinoamericano de Exploración, efectuado en Quito, Ecuador entre el 5 y 9 de septiembre de 1983, representa una importante muestra del afianzamiento de las acciones desplegadas por la Organización en procura de que los países de la región se beneficien de un aprovechamiento integral de sus recursos naturales y disminuyan su grado de dependencia en el sector energético.

Habían transcurrido casi cinco años desde cuando se iniciaron los primeros pasos para promover y difundir, dentro de la región latinoamericana, el uso masivo de la fuente energética más antigua del planeta: la geotermia. En efecto, en marzo de 1978 en la misma ciudad de Quito y con una amplia participación regional, se dio a luz la Metodología de Exploración Geotérmica, etapas de reconocimiento y prefactibilidad; como un instrumento de respuesta a las necesidades y características particulares latinoamericanas. En este lapso, los esfuerzos desarrollados, a través de la ejecución de más de una docena de proyectos de estudios enmarcados dentro de las actividades del PLACE, permitieron demostrar la aplicabilidad y ventajas de la metodología OLADE a la vez que acumular una serie de experiencias que contribuirían a su definitivo afianzamiento.

Durante las discusiones del presente seminario, tuvimos la gratísima oportunidad de observar que diecisiete (17) países de la región se encuentran actualmente empeñados en la ejecución de sus programas geotérmicos. Apoyados con el ejemplo de quienes fueron pioneros, a saber: México, El Salvador y Nicaragua, se han obtenido resultados sumamente alentadores en cuanto a la identificación de las áreas prospectivamente más interesantes.

Asimismo, apreciamos objetivamente la importancia del papel que puede desempeñar la geotermia dentro de la oferta energética de los países, al mirar que la Central Geotermoeléctrica de Ahuachapán (95 MW) puede garantizar un 45% del total anual de energía eléctrica consumida en El Salvador, y que la primera etapa de la central de Momotombo, esta cubriendo un 25% de la demanda eléctrica nacional de Nicaragua.

Los últimos adelantos científicos y tecnológicos en ramos como la vulcanología van a contribuir decididamente a la disminución del riesgo implícito en las primeras etapas de la exploración geotérmica, habiéndose observado con beneplácito los progresos alcanzados en los estudios realizados, en este campo, en Ecuador y Nicaragua.

El hombre latinoamericano que ha templado su carácter dentro de una geografía ancestralmente dominada por volcanes, tiene desde ahora la oportunidad de utilizar en beneficio de su colectividad y su propio bienestar a un elemento que muchas veces debió resultarle duramente hostil.

En definitiva, y no obstante la etapa de condiciones económicas difíciles por las que atravieza Latinoamérica, miramos que el proceso de cooperación e integración energética continúa fortaleciéndose y presentando avances sustantivos.

Estamos sumamente reconocidos del apoyo financiero y la confianza dispensada por el Banco Interamericano de Desarrollo, para la instrumentación del Programa de Capacitación para profesionales latinoamericanos en el área de la geotermia, uno de cuyos componentes es el presente seminario.

Asimismo, presentamos nuestra gratitud al Instituto Ecuatoriano de Electricificación (INECEL), por su invaluable y decidida ayuda para la preparación, realización del seminario y elaboración del presente documento.

ULISES RAMIREZ OLMOS
SECRETARIO EJECUTIVO

1. INTRODUCCION

1. INTRODUCCION

Bajo los auspicios de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), entre el 5 y 9 de Septiembre de 1983 tuvo lugar, en Quito - Ecuador, el Seminario Latinoamericano de Exploración Geotérmica.

El evento en mención forma parte de un programa de capacitación en Geotermia, para profesionales latinoamericanos, instrumentado a través del Convenio de Cooperación Técnica que fuera suscrito para el efecto entre OLADE y el BID en Marzo de 1983.

El Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) participó, además, como coauspiciador del evento.

Los objetivos del presente seminario estuvieron enmarcados dentro de los fines que persigue el Programa Latinoamericano de Cooperación Energética (PLACE), especialmente en cuanto al intercambio de información y la capacitación de los recursos humanos del sector energético.

Los temas enfocados durante su desarrollo fueron:

1. Revisión del estado actual de la energía geotérmica en los países de América Latina,
2. Estructuración de un documento preliminar base para la Metodología para estimación del potencial geotérmico.
3. Actualización de la Metodología OLADE para la exploración geotérmica en áreas volcánicas, Etapas de Reconocimiento y Prefactibilidad.

Se pudo contar con una amplia participación regional y, extraregional a través de ciento doce (112) representantes de dieciseis

(16) países miembros de OLADE, cuatro (4) países extraregionales y varios organismos e institutos internacionales, tanto del sector público como de la empresa privada.

Un grupo de seis (6) asesores de alto nivel tuvieron a su cargo las conferencias técnicas sobre las distintas disciplinas involucradas dentro de la exploración geotérmica, así como el apoyo a los grupos de trabajo que fueron estructurados para cubrir los puntos 2 y 3 del temario.

La presentación de los trabajos técnicos sobre el estado actual de la energía geotérmica en los distintos países de la región, fue cubierta por los respectivos Jefes o Responsables de los proyectos en ejecución.

Adicionalmente, se realizaron cinco (5) "panels" respecto a temas específicos tales como: Metodología de Exploración, Metodología de estimación del potencial, Aspectos Institucionales, Aspectos Financieros y Capacitación; en los mismos que participan varios señores Ministros de Energía, Directores y Asesores de Empresas Eléctricas de algunos países de la región.

En el presente documento se publican las conclusiones y recomendaciones del Seminario, los informes sobre el estado actual de la energía geotérmica en América Latina y, finalmente, los artículos técnicos presentados por los asesores-conferencistas invitados a participar en el Seminario.

El documento relativo a la Metodología de Exploración Geotérmica, Etapas de Reconocimiento y Prefactibilidad, enriquecido como producto del Seminario, se publica en un volumen aparte con el fin de facilitar su consulta.

1.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL SEMINARIO

1.1.1 ACTUALIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE RECONOCIMIENTO Y PREFACTIBILIDAD

El grupo de trabajo constituido para analizar este tema, considera que los resultados hasta ahora obtenidos en numerosas aplicaciones prácticas de la Metodología de exploración establecida por OLADE en 1978, han revelado que ésta representa el esquema más racional y económico para el desarrollo de un proyecto geotérmico dentro del contexto geológico dominante en los países de América Latina.

Las innovaciones que se proponen introducir no representan, por lo tanto, ninguna variación en la filosofía de fondo de dicha metodología; sino únicamente modificaciones sugeridas en base de los adelantos técnicos logrados en los últimos años, y la experiencia práctica acumulada en el desarrollo de varios proyectos.

Para ampliar los conceptos técnicos vertidos en la presente síntesis de conclusiones y recomendaciones, se incluyen, en este mismo volumen, los documentos técnicos presentados al Seminario por los asesores-conferencistas.

Reconocimiento

Las modificaciones recomendadas se refieren principalmente a la necesidad de introducir en la metodología, algunos conceptos modernos, en cuanto a las ciencias vulcanológicas, tales como el énfasis asignado a la importancia de los fenómenos freato magmáticos y el estudio de la alteración hidrotermal en los xenolitos; así como algunas especificaciones sobre el equipo y técnicas de muestreo utilizadas en la prospección geoquímica.

En esta etapa debería también intentarse la realización de balances hidrogeológicos preliminares en áreas seleccionadas, utilizando los datos hidro-meteorológicos existentes. Se sugiere además, la necesidad de efectuar una evaluación estimativa del recurso geotérmico, aún desde esta etapa preliminar de los estudios.

Prefactibilidad

A continuación se indican las principales sugerencias de cambios o innovaciones en las distintas disciplinas involucradas en los estudios de esta etapa:

- a) Vulcanología.- Se sugiere la realización de estudios tendientes a la modelización cuantitativa de la cámara magmática y de la anomalía térmica conductiva con ella asociada, cada vez que el contexto vulcanológico así lo permita.
- b) Geoquímica.- Se sugiere enfatizar sobre la conveniencia de la aplicación de las técnicas isotópicas, principalmente las de oxígeno e hidrógeno y en la utilización de los geotermómetros y modelos de mezcla. En la edición actualizada de la metodología se sugiere, también, revisar la importancia de la geoquímica de los gases y especificar los casos en los cuales las técnicas basadas sobre la distribución de gases en el suelo, podrían aportar con resultados útiles en la exploración geotérmica.
- c) Hidrogeología.- Además de los balances hidrogeológicos necesarios para realizar una estimación de la recarga hídrica natural del reservorio, se sugiere la elaboración de un modelo del sistema natural que incluya la conducción y convección de calor para lo cual se tendría

que utilizar valores estimados promedio de la permeabilidad del reservorio.

- d) Geofísica.- Se confirma que no existe un esquema universal de aplicación de las técnicas geofísicas, que pueda considerarse enteramente válido para todos los casos; y que por lo tanto, en cada estudio de prefactibilidad debería definirse un programa de exploración en base de las características geológicas, hidrogeológicas y morfológicas específicas del área de la investigación.

Se sugiere la necesidad de la intervención de un geofísico experimentado, desde las fases iniciales de la exploración para que fije el alcance del programa; así como, cada vez que sea posible, la realización de pruebas preliminares de geoeléctrica que ayuden al escogimiento del método más idóneo a emplearse.

Se subraya la importancia de que todos los especialistas de las diferentes disciplinas que intervienen en un proyecto de exploración geotérmica, contribuyan mancomunadamente al establecimiento de un modelo del sistema natural.

Finalmente, el grupo de trabajo hace propias las sugerencias de varios delegados y representantes de organismos internacionales y recomienda a OLADE, que incorpore dentro de su metodología de exploración geotérmica, como una parte de los estudios de reconocimiento y prefactibilidad, un análisis técnico-económico que permita utilizar a dichos estudios, como documentos de referencia para el trámite del financiamiento de la etapa sucesiva del proyecto.

1.1.2. METODOLOGIA SOBRE LA ESTIMACION DEL POTENCIAL GEOTERMICO

Después de realizadas varias sesiones de trabajo, así como un panel general de discusión, el grupo de trabajo ha llegado a establecer las recomendaciones que se mencionan a continuación, tendientes a esquematizar los puntos fundamentales de lo que constituirá una metodología que permita efectuar una estimación satisfactoria del potencial geotérmico de un campo. Se confirma la necesidad de que los países de la región dispongan de una herramienta que viabilice la evolución de sus recursos geotérmicos, con fines de planificación y toma de decisiones en cuanto a sus programas nacionales.

1. Adoptar las definiciones estandar, propuestas durante la reunión, relacionadas con los términos: recurso geotérmico y reserva geotérmica, incluyendo sus diversas categorías.
2. Dado el grado alto de incertidumbre, que durante la etapa de reconocimiento presenta la estimación de los parámetros básicos necesarios para efectuar la evaluación del potencial de un campo geotérmico con un grado de seguridad adecuado, se propone desarrollar una correlación que tome en cuenta los datos razonablemente factibles de obtenerse durante dicha etapa. Como una primera aproximación se sugiere desarrollar, para cada tipo de roca, una correlación entre las variables: volumen de material emitido durante la erupción versus la edad de la misma, tomando como parámetro de ajuste la cantidad de energía térmica asociada con la intrusión magnética. La metodología empleada y los resultados obtenidos durante la primera evaluación, pasarán a integrarse a un proceso dinámico con revisiones periódicas, el mismo que se tornaría gradualmente más confiable a medida que se obtenga un mayor volumen de información en cada una

de las etapas exploratorias.

3. Programar a la brevedad posible, una reunión de trabajo sobre la evaluación de los recursos geotérmicos en las diferentes etapas de un proyecto, con el objeto de desarrollar la correlación mencionada en el punto anterior, así como también establecer un procedimiento alternativo para el referido mecanismo de evaluación. Sería recomendable que en esta reunión participe por lo menos un experto de cada una de las disciplinas que intervienen en los estudios de cada una de las fases de la Metodología OLADE. Además, se considera muy conveniente que en esta misma reunión se pueda disponer de suficientes datos proveniente de los proyectos geotérmicos latinoamericanos, lo que permitiría calibrar en forma adecuada los modelos y la metodología a desarrollarse.
4. Al finalizar los estudios de la fase de prefactibilidad, se recomienda utilizar como una guía la metodología de evaluación presentada en la circular 790 del " United States Geological Survey ". Se considera que en la reunión de expertos mencionada en el punto anterior, puede estudiarse a fondo esta metodología, con el objeto de detectar aquellos parámetros cuya aplicabilidad se juzgue difícil bajo las condiciones predominantes en el medio latinoamericano.
5. La metodología que llegue a estructurarse tomando en cuenta el ambiente geológico dominante, la tecnología y recursos locales, deberá permitir que se elimine el empleo de otras tecnologías que no se adapten a las reales necesidades de los países latinoamericanos.

1.1.3. FINANCIAMIENTO DE PROYECTOS GEOTERMICOS

Durante las discusiones sobre este tema se detectaron diferentes inquietudes relacionadas con la problemática financiera de los proyectos, las mismas que se pueden condensar en las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Debería analizarse la eventual disponibilidad de recursos financieros para apoyar la ejecución de proyectos geotérmicos a través de operaciones de las agencias internacionales de crédito así como de varios gobiernos de países, principalmente en cuanto a donaciones y préstamos concesionales.
- Resulta indispensable estructurar los proyectos con un suficiente respaldo técnico y justificación económica adecuada. La metodología OLADE representa, en este campo, un apropiado marco de referencia en cuanto a los estudios que deberían desarrollarse en cada una de las etapas. De esta forma, se podrían identificar algunas actividades innecesarias o excesivamente costosas que, eventualmente, podrían ser propuestas por los financiadores como condicionante para concesión de los préstamos.
- Durante el proceso de negociación de las operaciones de financiamiento, se deberá tomar en cuenta la capacidad técnica, disponible dentro de la región, para la ejecución y/o supervisión de los estudios exploratorios; siempre considerando un armónico complemento con tecnología y recursos extrarregionales.
- La energía geotérmica representa una buena alternativa para el equipamiento de los sistemas eléctricos en vista de sus costos competitivos, la posibilidad de realizar inversiones graduales y de complementar a otras fuentes tales como la hidroelectricidad.
- El Programa de Geotermia de OLADE ha demostrado la capacidad regional de captar recursos financieros para ser utilizados en el desarrollo de proyectos específicos.

- En efecto, dentro del Programa Latinoamericano de Cooperación Energética (PLACE), se han instrumentado proyectos que cuentan con un aporte externo en términos concesionales o de donación, que cubre alrededor del noventa por ciento (90%) de su costo total.
- Consecuentemente, los países miembros interesados podrían aprovechar de la capacidad de gestión y el soporte técnico que puede proveer OLADE, tanto a través de su personal de planta como de las instituciones nacionales especializadas.
- Durante el desarrollo de los estudios correspondientes, a las etapas más avanzadas de la exploración geotérmica, que han sido financiados a través de los préstamos otorgados directamente a los países, la acción de OLADE se ha orientado exitosamente a la asesoría y seguimiento de las actividades inherentes tanto a la gestión como a la propia ejecución, en procura de obtener costos relativamente bajos, plazos razonables y la utilización de tecnologías adecuadas.

En el desarrollo de las etapas avanzadas, financiados con préstamos otorgados a los países, la acción de OLADE se ha encaminado exitosamente a la asesoría y seguimiento de las actividades tanto en etapa de gestión como de ejecución, resultando en costos relativamente bajos, plazos razonables y utilización de tecnología apropiada.

1.1.4. CAPACITACION DE RECURSOS HUMANOS

Durante la discusión de la problemática inherente a la capacitación de los recursos humanos indispensables para un adecuado desenvolvimiento de las diferentes etapas de un proyecto geotérmico, se resaltaron varios aspectos los mismos que se incluyen en las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Deberán condicionarse los esfuerzos tendientes a lograr que los cursos de capacitación que se organicen dentro de la región, resulten complementarios entre sí, considerando que ningún país, por sí mismo podría disponer de todos los recursos y experiencias en un campo tan amplio y complejo como el de la exploración, desarrollo y explotación de los recursos geotérmicos.
- Se ha demostrado la conveniencia de no centralizar en un sólo país las actividades de capacitación, en vista de la disponibilidad de las características geológicas y los distintos niveles de desarrollo de las actividades.
- Sería recomendable aprovechar la estructura y recursos disponibles propendiendo al afianzamiento de centros subregionales de capacitación.

1.1.5. ASPECTOS INSTITUCIONALES

Las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas como fruto de la discusión y análisis de este tema fueron los siguientes:

- Puede considerarse que la energía geotérmica es un recurso de carácter renovable siempre que su proceso de explotación esté racionalmente aplicado al tomar en cuenta factores como la inyección de los fluidos residuales y el desarrollo gradual.
- La aplicación de la metodología OLADE permite que, de una forma equilibrada, se disminuya progresivamente el riesgo característico de las primeras etapas de la exploración y se incremente la confiabilidad en base de la información sistemática colectada y en forma multidisciplinaria.

Al alcanzarse las etapas de desarrollo y explotación, la experiencia acumulada a través del tiempo, en México, El Salvador y otros países extrarregionales, ha demostrado la seguridad de la generación geotermoeléctrica,

- Por la naturaleza multidisciplinaria y especializada de las actividades geotérmicas, debería propenderse a la integración de grupos profesionales nacionales, dentro de cada país, con dedicación exclusiva a sus programas de ejecución.
- Considerando que en la mayoría de los casos las actividades geotérmicas, que se desenvuelven dentro de la región, están a cargo de las empresas eléctricas, sería conveniente enfatizar sobre la necesidad de que, durante la explotación de un campo, se mantengan integrados los grupos geotérmicos para que asuman la responsabilidad de control sobre el comportamiento y evolución de los reservorios y la definición de las políticas de explotación que más se adapten a las condiciones del campo. En este aspecto puede resultar conveniente una prudente limitación de responsabilidades entre

quienes manejan la central y los técnicos del campo.

- En las condiciones actuales sería conveniente que se establezcan proyectos pilotos sobre las aplicaciones directas de la energía geotérmica en los procesos industriales y agroindustriales, considerando la eventual profusión de los recursos de media y baja entalpía existente en la mayoría de los países de la región y, especialmente, para aprovechar los residuos de los campos de alta temperatura que se encuentran en la etapa de desarrollo y/o explotación.
- Sería muy conveniente adelantar en todos los países, las acciones tendientes al establecimiento o actualización de una legislación sobre la exploración y explotación de los recursos geotérmicos.

Se ha notado que son pocos los países que cuentan con un marco legal en este campo por lo que OLADE debería cooperar en la difusión y orientación para cubrir este déficit en sus países miembros.

2. SINTESIS POR PAISES

2.1. "ESTADO ACTUAL DE LAS INVESTIGACIONES GEOTERMICAS EN BOLIVIA"

Empresa Nacional de Electricidad S.A.
"ENDE"
Cochabamba

1. RESUMEN

La evaluación del potencial de energía geotérmica en Bolivia se inició en 1976, habiéndose identificado 42 manifestaciones termales situadas entre las cordilleras Occidental y Oriental al Suroeste del país. El potencial geotermoeléctrico del país se estima en 350 MW.

En base al Proyecto de Evaluación de los Recursos Energéticos de Bolivia, se determinó que las zonas más favorables para el desarrollo geotermoeléctrico son las del Valle del Río Empexa y Laguna Colorada al Suroeste del país. Los estudios de prefactibilidad realizados en ambas zonas recomiendan la continuidad de la fase de factibilidad del campo de "Sol de Mañana". Las investigaciones realizadas abarcaron aspectos geológicos, vulcanológicos, hidrogeológicos, geoquímicos, geofísicos y perforación de pozos de gradiente.

En Bolivia se requiere y se requerirá crecientemente personal técnico especializado en exploración y desarrollo de recursos geotérmicos, en vista de las perspectivas mediatas e inmediatas que ofrece la explotación económica y altamente competitiva de este recurso con relación a otras fuentes. En los próximos cinco años se prevé la realización de los estudios de factibilidad del campo Sol de Mañana, con financiamiento externo, que incluya la perforación de pozos profundos, para la evaluación del potencial energético del campo, cuyo objetivo final sería la instalación de la primera central geotermoeléctrica de 30 MW.

Debido a la posición geográfica de los campos geotérmicos, en una zona con escasos recursos hidroeléctricos y energéticos fósiles, su utilización en la generación eléctrica y otros usos industriales y domésticos, ésta sería complementaria con otras fuentes de energía, pudiendo aún permitir temporalmente la postergación de grandes inversiones en proyectos hidroeléctricos.

2. CRONOLOGIA DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Las primeras actividades tendientes a evaluar los recursos geotérmicos de Bolivia, se realizó en el año 1976, mediante el levantamiento del inventario de las manifestaciones geotérmicas existentes en el país. Esta actividad fue parte integrante del Proyecto de Evaluación de Recursos Energéticos de Bolivia, desarrollado con asistencia del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) BOL 71/532, con participación de la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE), y los Ministerios de Energía e Hidrocarburos y Minería y Metalurgia.

El estudio evaluativo mostró que existían varias áreas geotérmicas recomendables para trabajos exploratorio en detalle, susceptibles de un desarrollo para aprovechamiento de energía eléctrica y otros usos. Los de mayor importancia se hallan ubicados a lo largo de la Cordillera Occidental, cerca del límite fronterizo con la República de Chile, relacionados con la actividad volcánica reciente; igualmente se identificó manifestaciones geotérmicas en el Altiplano y la Cordillera Oriental (Ver Fig. 1 - Ubicación de las Principales Manifestaciones Geotérmicas en Bolivia). Como resultado de este trabajo se identificaron dos áreas favorables para un desarrollo energético futuro: Valle del Río Empexa y Laguna Colorada.

Posteriormente, con la participación de la Empresa Consultora Geotecneco del Grupo ENI de Italia, entre junio y septiembre del mismo año (1976), se efectuó un estudio de reconocimiento de estos recursos, abarcando principalmente la zona Suroeste de Bolivia, con el objeto de determinar las posibilidades geotérmicas de la zona. El estudio con-

firmó los primeros resultados del estudio de PNUD - ENDE, indicando como áreas más favorables, por sus características tanto potenciales como por su ubicación geográfica, a las del "Valle del Río Empexa" (Towa) y "Laguna Colorada", recomendándose realizar en ellas un estudio a nivel de Prefactibilidad. (Ver Fig. 2 - Aprovechamiento de los Recursos Geotérmicos del Suroeste de Bolivia).

En 1978 y 1979, se efectuaron los estudios de prefactibilidad en las dos áreas seleccionadas: "Valle del Río Empexa" y "Laguna Colorada", siguiendo la Metodología de Exploración Geotérmica propuesta por OLADE. Este fue realizado por la Consultora "Aquafer" (antes Geotecnico) de Italia.

El estudio se desarrolló en tres Fases:

- Fase I : Investigaciones geológicas: geología estructural, foto geología, geovulcanología, petrografía, geoquímica e hidrogeología.
- Fase II : Prospección Geofísica: gravimetría, magnetometría y geoelectrica.
- Fase III : Perforación: pozos de gradientes (pozos someros = 150-170 m. de profundidad).

Las actividades de las dos primeras Fases (I y II) fueron desarrolladas en 1978 y la Fase III en 1979, habiendo concluido el estudio con la elaboración del informe final a mediados de 1980.

3. ESTADO ACTUAL DE LAS INVESTIGACIONES EN CADA AREA (RESULTADOS)

Los estudios exploratorios en las áreas citadas se encuentran en la fase de Prefactibilidad. Ambas áreas se localizan en la Cordillera Occidental de los Andes, muy próximas a la frontera con Chile, a una eleva

ción promedio de 3700 a 4500 m.s.n.m. Los resultados de las investigaciones correspondientes a la fase de prefactibilidad se sintetizan en los párrafos siguientes:

a- Area Valle del Río Empexa

El área se encuentra localizada directamente al Oeste del Río Salar de Uyuni, uno de los más caudalosos del mundo.

Las investigaciones geológico-vulcanológicas y los análisis petrográficos, muestran la existencia en esta área, de una cámara magnética superficial de gran volumen, centrada aproximadamente sobre una estructura de hundimiento. Las manifestaciones termales del área se asocian con la presencia de la cámara magnética descrita. Las principales están localizadas en la localidad de Abra de Napa (Fuente Towa) y en el margen Sur del Río Salar de Empexa.

El modelo hidrogeológico indica que las rocas de la cadena volcánica son muy permeables, constituyendo por lo tanto la zona de mayor recarga hidrogeológica. La cobertura impermeable o capa sello está constituida por sedimentos vulcano-clásticos y lacustres. La geoquímica clasifica las aguas del área en dos tipos químicos: una de ellas denominada tipo "A" de composición bicarbonato-alcálico-terrosa de baja salinidad y, las del tipo "B", de amplia variación de composición, como sulfato-cloruro-alcálico, que podrían haber sido contaminadas por el salar, pero son de salinidad relativamente moderada.

Los resultados geofísicos han determinado que área de interés, comprendido entre El Desierto y la fuente Towa, está delimitado por dos fallas y que el basamento se localiza a una profundidad de aproximadamente 800 - 1000 m.; la presencia de un mínimo gravimétrico se relacionaría con la existencia de una fosa estructural. Se han registrado resistividades bajas (0.5 - 5 Ohms/m), que indican la presencia de materiales de alteración hidrotermal y/o estratos saturados de soluciones acuosas salinas.

Entre las áreas investigadas, la más favorable y mejor delineada es la de El Desierto - Towa con marcadas anomalías geofísicas donde el horizonte eléctricamente conductivo tiene un espesor variable entre 800 a 1000 metros.

Los pozos de gradiente (pozos someros) perforados en el área fueron 6 (seis), con profundidades entre 154 a 165 m. Su ubicación fue definida en base a los resultados de las investigaciones geocientíficas. En cada pozo se efectuaron medidas de temperatura para determinar el gradiente geotérmico, y se tomaron muestras del agua para el estudio geoquímico.

Los resultados de los pozos confirmaron la existencia de una anomalía térmica entre El Desierto y Fuente Towa. Los gradientes geotérmicos estimados varían de 2 a 6°C/10 m.

El estudio geoquímico de las aguas de los pozos, indica la existencia de ascenso de fluidos termales en correspondencia con las fallas que alimentan las manifestaciones en el área.

La geotermometría en el caso de la Fuente de Towa, con un tenor mayor de SiO₂, sugiere que la temperatura del acuífero profundo estaría alrededor de 240°C. La existencia de un horizonte con valores de resistividad muy bajos, a profundidades poco mayores de 500 m., es indicio de la presencia en áreas de horizontes salinos o de zonas de alteración hidrotermal.

En general, todos los datos indican que el área comprendida entre El Desierto y Fuente Towa, resulta ser la más interesante desde el punto de vista geotérmico, con temperaturas de fondo alrededor de 230 - 240°C. El potencial reservorio estaría ubicado a una profundidad aproximada de 800 - 1000 m.

b- Laguna Colorada

El área se encuentra ubicada en la Cordillera Occidental cercana a la frontera con Chile, aproximadamente a 200 km. hacia el sur del Campo de Empexa. Al Oeste de esta área se localiza el campo geotérmico chileno de El Tatio, en territorio chileno.

Los estudios geológicos-vulcanológicos indican la presencia en el área de rocas volcánicas de edad Cuaternaria, las cuales están afectadas por fracturamiento intenso.

Un indicio geotérmico evidente en el área es la presencia de por lo menos tres campos fumarólicos de notable extensión.

En el área no se han observado niveles superficiales de cobertura impermeables. Sin embargo, muchas zonas de fallas (fracturas), muestran características de un hidrotermalismo, lo cual puede ser indicio de un proceso hidrotermal fósil que haya dado origen al fenómeno de autosellamiento de las formaciones volcánicas que forman el techo del eventual reservorio

El elevado gradiente geotérmico superficial indica que las rocas del techo son densas e impermeables a poca profundidad, debido a la alteración hidrotermal. Esta situación y la presencia de una importante actividad tectónica, señalan la existencia en el área de un reservorio caracterizado por fracturamiento.

La hidrogeología y la geoquímica han permitido agrupar las aguas del área en tres grupos: Grupo "A", corresponde a aguas enriquecidas en sulfato, provenientes de fases gaseosas; Grupo "B", aguas con cloruro alcalino (de termalidad media), y Grupo "C", aguas con sulfato-bicarbonato alcalino terroso. El estudio geoquímico ha demostrado que las aguas de las manifestaciones están caracterizadas por tenores absolutos altos en Boro y Amoníaco, PH ácido y salinidad media a alta. Se considera que las manifestaciones están influenciadas por vapor geotérmico proveniente de acuíferos de alta temperatura (200-250°C), aspecto que es comprobado por la composición de los gases, los cuales demuestran un

predominio de CO_2 y por la relación $\text{CH}_4\text{-H}_2$ que muestra temperatura de equilibrio elevada.

Las investigaciones geofísicas, indican que las anomalías están relacionadas a las áreas de mayor interés geotérmico. La gravimetría y la magnetometría indican que el basamento terciario se localiza a una profundidad promedio de 1000 a 1500 m., con un máximo de 2000 m.

En esta área sólo se perforó un pozo de gradiente (somero), cuyos resultados son satisfactorios, habiendo llegado a confirmar los resultados de las investigaciones precedentes, que señalan el área como un campo geotérmico de alta entalpía y que los fluidos suben a lo largo de fallas.

Inicialmente, el pozo fue programado para una profundidad de 400 m., pero solamente se pudo perforar hasta los 127 m.; debido a que la perforación interceptó una zona de fracturamiento, a través de la cual produjo al instante vapor seco. Esta situación ha confirmado que en el subsuelo del área existe un campo geotérmico de alta entalpía. La temperatura estimada en el fondo del pozo es de alrededor de 200°C . El gradiente geotérmico estimado es alrededor de $15^\circ\text{C}/10\text{ m}$.

4. PROBLEMAS ENCONTRADOS

Un problema que afecta en especial a toda la Unidad Fisiográfica de la Cordillera Occidental Boliviana es el de la recarga de los acuíferos subterráneos.

La alimentación de pequeñas cuencas cerradas existentes es atribuida a las precipitaciones directas (lluvias o nieve), las cuales se consideran en realidad de poca importancia, pues la pluviometría media es escasamente superior a los 100 mm., siendo la evaporación en la zona muy alta.

Realizando una correlación del caudal de algunas vertientes, como la de Empexa (50 l/seg.) y tomando en cuenta la extensión areal de la cuenca de alimentación, se ve que no es posible justificar este caudal con relación al volumen de las precipitaciones directas. Por lo tanto, los notables caudales en las fuentes se atribuye a que la alimentación es debida a fenómenos de condensación del vapor y deshielos en los niveles sub-superficiales.

Este aspecto de la recarga deberá merecer una cuidadosa atención en los futuros estudios. Fuera de lo indicado no se ha encontrado problemas significativos, hallándose las características de los campos geotérmicos estudiados dentro de lo normal.

5. PRINCIPALES NECESIDADES Y RECURSOS HUMANOS DISPONIBLES

Una de las principales necesidades para continuar con los estudios e investigaciones, tal como se dice en el siguiente capítulo, es la falta de recursos financieros; su disponibilidad está sujeta al financiamiento externo.

La "Comisión Nacional del Proyecto Geotermia" es el organismo gubernamental de ejecución y está constituida por la Empresa Nacional de Electricidad, la Corporación de Desarrollo de Potosí (CORDEPO) y el Ministerio de Minería y Metalurgia. La dirección del Proyecto cae bajo la responsabilidad de ENDE. El número total de técnicos que involucra el proyecto asciende a la cantidad de 10 personas.

Bolivia cuenta con escaso personal técnico en el campo geotérmico. La participación del PNUD y las empresas consultoras permitieron una relativa preparación práctica y teórica del personal.

En fases posteriores del proyecto geotérmico, el país deberá contar con personal nacional especializado, que permita cubrir los crecientes requerimientos.

6. PROGRAMAS PREVISTOS DENTRO DE LOS PROXIMOS 5 AÑOS

A pesar de que investigaciones superficiales más detalladas permitirían una mejor definición de las características estructurales, hidrogeológicas y geotérmicas de las dos áreas seleccionadas, se cree que los datos disponibles son suficientes para pasar a la Fase de Perforación Profunda y a los correspondientes estudios geocientíficos de la etapa de Factibilidad.

La Evaluación Técnico-Económica realizada por "ELECTRO-CONSULT" (ELC), entre Octubre de 1981 y Marzo de 1982, de los estudios efectuados, conluye con la selección del campo de Laguna Colorada "Sol de Mañana" para una explotación futura, habiéndose establecido un "Plan de Desarrollo" que incluye el Estudio de Factibilidad para el montaje de la primera planta geotermoeléctrica de 30 MW, o como alternativa la instalación de dos unidades de 15 MW cada una.

La continuidad de los estudios en cualquiera de las áreas, está sujeta a las limitaciones presupuestarias por las que atraviesa la República de Bolivia. Se ha presentado una solicitud de financiamiento de PNUD por un monto de US\$ 10.100.000 para proseguir con los estudios. Paralelamente el Gobierno de Bolivia ausculta otras fuentes de financiamiento.

7. PERSPECTIVAS DEL RECURSO - INCIDENCIA DENTRO DEL SECTOR DE LA ENERGIA DEL PAIS

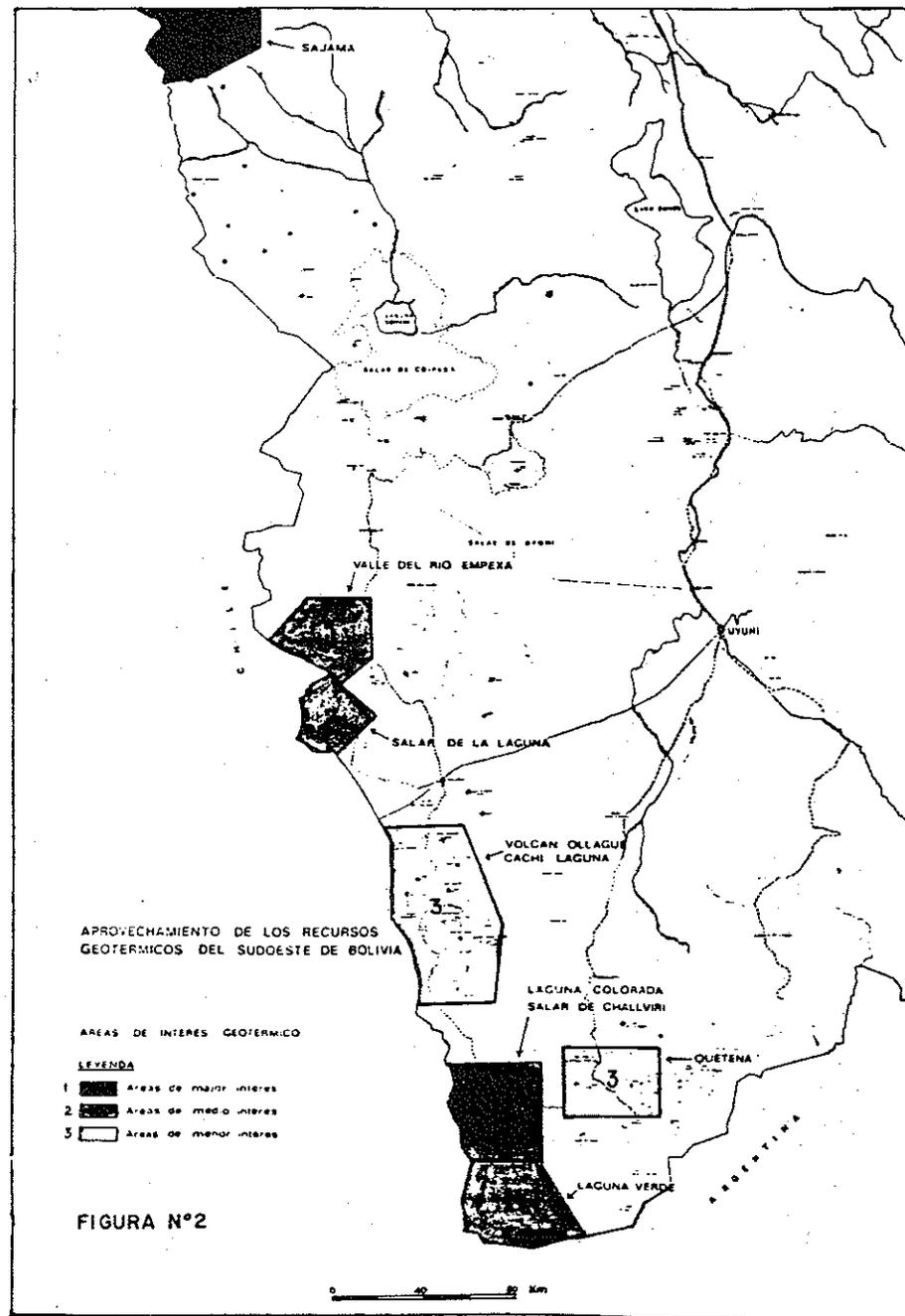
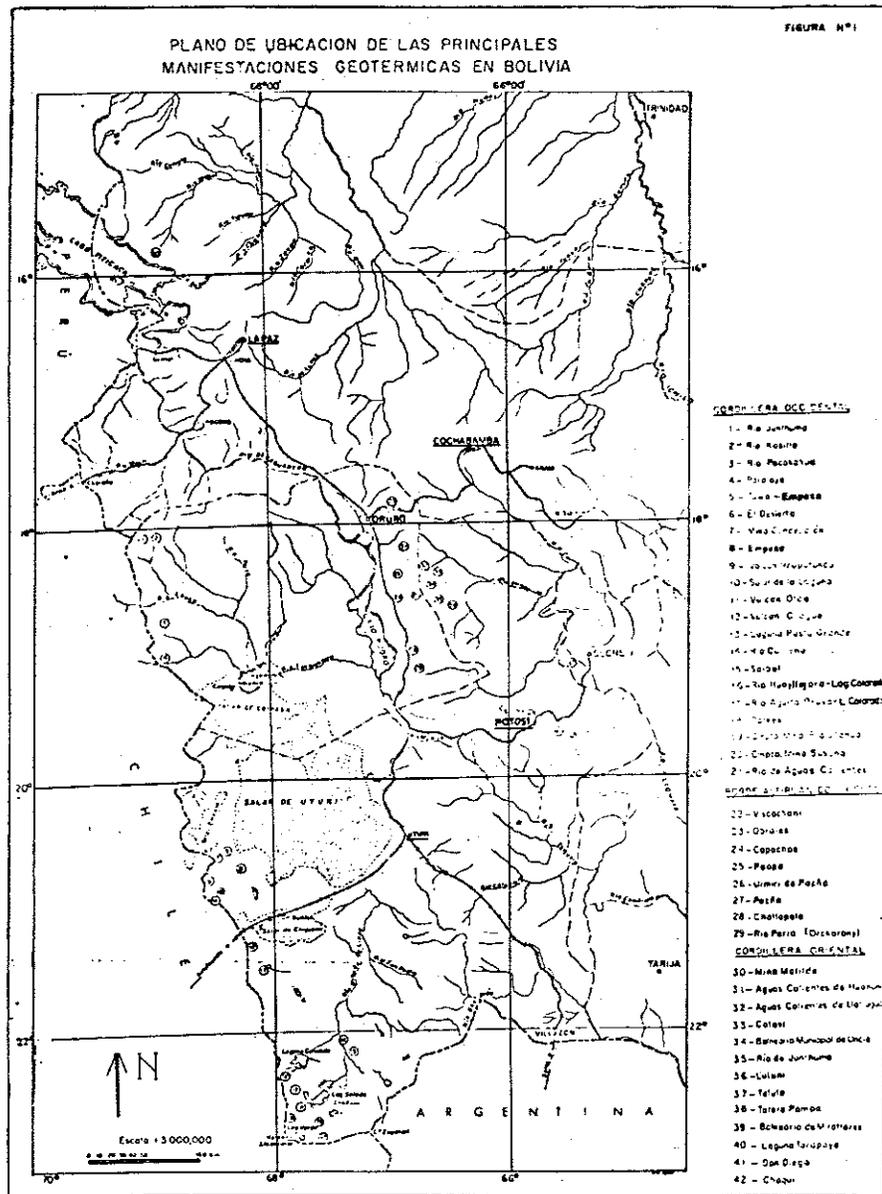
En Bolivia la hidroelectricidad y el gas natural se han constituido en los recursos primarios, sobre los cuales se fundamenta el desarrollo eléctrico del país, los cuales han permitido estructurar una política de sustitución de los hidrocarburos líquidos, disminuyendo en cierta medida el impacto económico que se escasez ha ocasionado en la economía nacional.

La investigación de los recursos geotérmicos (en las dos áreas) ha permitido mostrar una nueva fuente energética primaria, señalando que estos recursos son positivamente aprovechables para generación de energía eléctrica, y que permiten reducir el uso de las fuentes energéticas no renovables, como son los hidrocarburos gaseosos y líquidos.

La situación geográfica de los campos geotérmicos favorece su utilización como fuentes primarias de energía, debido a la relativa escasez de otros recursos energéticos en el área donde se presentan.

El análisis del Sistema Eléctrico Interconectado y del Plan Nacional de Electrificación efectuado por ELC de Italia, muestra que una planta geotermoeléctrica en Bolivia, sería una alternativa viable de las plantas "hidroeléctricas de pasada", por sus elevados factores de planta (93%) que permiten cubrir la demanda de energía de base.

Por otro lado, debido a las condiciones climáticas de la zona, de bajas temperaturas durante todo el año, los recursos geotérmicos podrían también ser utilizados para calefacción doméstica y para usos industriales.



2.2. ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACION GEOTERMICA DEL MACIZO VOLCANICO DEL RUIZ - COLOMBIA

Central Hidroeléctrica de Caldas S.A., CHEC
Manizales - Colombia

1. Cronología de las actividades desarrolladas

A finales de 1968 se firmaron los acuerdos entre el ENTE NATIONALE PER L'ENERGIA ELETRICA de Italia -ENEL- y la CENTRAL HIDROELECTRICA DE CALDAS -CHEC- cuyo objetivo fue: evaluar la posible existencia de fluidos endógenos utilizables para generación eléctrica en una área de exploración de 15000 km^{2.}, comprendida desde el lindero con el Departamento de Antioquia entre los ríos Magdalena y Cauca, hasta la carretera Armenia-Ibagué. En esta fase se estudió la geología regional, se recopiló la información de interés y se realizó una campaña geoquímica e isotópica. Se concluyó con la conveniencia de adelantar el proyecto de investigación en FASES, de tal manera que con el menor costo se obtenga la mayor información para decidir la ejecución o no de la fase subsiguiente.

A raíz del convenio de cooperación técnica ITALO-COLOMBIANO en 1978, relativo al proyecto de investigación geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz; el ENEL, el Instituto Colombiano de Energía Eléctrica -ICEL- y la CHEC, con el financiamiento parcial del Fondo de Proyecto de Desarrollo -FONADE-, adelantó los trabajos de la FASE I con los servicios técnicos de la firma Consultora Técnica Colombiana -CONTECOL-, cuyo objetivo fue determinar el Modelo Geotérmico Preliminar de los campos geotérmicos que eventualmente podrían localizarse en una área de 2000 km^{2.} (Fig. 2), que para tal objeto fue previamente seleccionada y la cual comprende las localidades de Espíritu Santo-San Diego-Manzanares,

Manizales-Ruiz-Botero Lodoño, Murillo y parte del cañón del Río Toche.

Los estudios geocientíficos realizados fueron los siguientes: tres cortes geológicos, esquema tectónico de los sectores Espíritu Santo (200 km^{2.}) y Manizales (300 km^{2.}), recolección de xenolitos en lavas, reconocimiento de focos volcánicos en fotos aéreas, algunos análisis isotópicos, muestreo y caracterización de las aguas termales y frías, desarrollo de una red gravimétrica con una estación por km^{2.} en Espíritu Santo (200 km^{2.}) y Manizales (300 km^{2.}), con amarre topográfico a la red geodésica nacional; 19 S.E.V. tipo Schlumberger en el Espíritu Santo y 30 S.E.V. Schlumberger en Manizales, todos ellos cortos y dispersos; en los ríos Toche y Combeima un reconocimiento geológico general y muestreo de algunas fuentes termales y frías.

La conclusión final de los estudios consistieron en la elaboración de un esquema geotérmico (muy preliminar) de alta entalpía en el área de Manizales-Ruiz-Botero Lodoño-San Vicente y otro de baja y media entalpía (?), en el Espíritu Santo, Manzanares y San Diego; y la conveniencia de adelantar estudios en el Nevado del Tolima y Volcán Machín.

En Marzo de 1983, la CHEC con el financiamiento parcial de FONADE, y los servicios de CONTECOL y GEOTERMICA ITALIANA, deciden adelantar estudios complementarios dentro de la fase II de la metodología OLADE, con el objeto de formular un Modelo Geotérmico en las áreas Ruiz-Botero Lodoño-San Vicente y Nevado del Tolima-Volcán Machín. Los estudios geocientíficos comprendieron levantamientos vulcanológicos a nivel de prefactibilidad de las áreas citadas y la realización de 109 S.E.V. tipo Schlumberger en el área de Ruiz-Botero Lodoño-San Vicente. Mediante estos estudios se delimitaron áreas más estrechas (decenas por kilómetros cuadrados), pero de mayor interés geotérmico como son los sitios de Nereidas y Laguna del Otún, donde se deberán realizar estudios detallados.

2. Estado actual de las investigaciones en diferentes áreas

- a- Area Ruiz-Botero Londoño-San Vicente, en la cual se delimitó la fracción: Nereidas y Laguna del Otún como áreas preferenciales, en éstas se efectuaron las investigaciones de prefactibilidad sin estudios de microdetalle.
- b- Area Volcán Machín y Cerro España: se han realizado estudios de prefactibilidad sin Geofísica.
- c- Area Espíritu Santo-San Diego: se encuentra en fase de Reconocimiento, pero existen estudios geofísicos parciales.

3. Problemas encontrados

Las labores de exploración se han visto interrumpidas entre fase y fase por varios años, a causa de:

- Alto costo del personal asesor.
- Utilización de equipos obsoletos en la prospección de campo.
- Falta de equipos y de una metodología adecuada para análisis químicos e isotópicos, lo cual consecuentemente eleva los costos.
- Falta de participación del personal nacional en el procesamiento e interpretación de datos geoquímicos.
- Falta de una adecuada transferencia de tecnología por parte de los consultores.
- Falta de personal nacional capacitado en todas las disciplinas.
- Los sistemas de contratación y fondos presupuestados enmarcan como en camisa de fuerza las actividades por desarrollar.
- Desconocimiento en el personal para brindar a la asesoría el apoyo

integrado y consecuente con las circunstancias peculiares del proyecto, lo cual ha causado desconexiones entre los objetivos y labores realizadas por los diferentes grupos asesores que han participado en el proyecto.

4. Principales necesidades y recursos humanos

Necesidades

Colombia como la mayoría de los países latinoamericanos, es importador de petróleo, por tal razón el país se ha visto en la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía, incluyendo las no convencionales tales como la geotérmica.

El proyecto del Ruiz representa la investigación Geotérmica más avanzada de Colombia, el cual requiere la inmediata financiación de las perforaciones exploratorias profundas que permitirán evaluar el recurso. Con la instalación de una central geotermoeléctrica en este campo, se contribuirá a aliviar el déficit de energía eléctrica existente en la región.

Es necesario continuar la capacitación de los técnicos colombianos en las diferentes disciplinas, mediante la participación de éstos en los cursos internacionales o a través de la realización de eventos nacionales que promuevan la difusión de las técnicas geotérmicas.

Ante la proximidad de las actividades de exploración profunda, se hace necesario solicitar el apoyo y la colaboración de los países latinoamericanos que tienen experiencia en este campo, mediante el intercambio de información científica y técnica. Igualmente se adolece de un mecanismo que facilite la adquisición de los equipos y materiales de perforación geotérmica adecuados, con el fin de que el país paulatinamente gane la autonomía necesaria para emprender por sí solo, campañas a gran escala dirigidas y ejecutadas por personal colombiano.

Durante el desarrollo de las fases iniciales de la exploración geotérmica, los técnicos nacionales no han tenido acceso directo a los labores de sistematización e interpretación de los datos de campo, relegándolos a planos secundarios. Esto se debe a que el personal asesor, que generalmente es foráneo, pierda el contacto y la comunicación permanente con los técnicos nacionales dificultando la adecuada transferencia de tecnología.

Recursos Humanos Disponibles

La investigación geotérmica del Macizo Volcánico del Ruiz está bajo la dirección y coordinación de la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) y ha sido realizada con la participación de compañías colombianas de consultoría, bajo la asesoría de científicos extranjeros (Italia).

Los trabajos de recolección y sistematización de los datos de campo, la ejecución y/o materialización de los aspectos geofísicos, geoquímicos y geológicos, se han efectuado con la intervención de técnicos colombianos contratados por las firmas consultoras del país, atendiendo a las programaciones que han planteado las diversas entidades extranjeras encargadas de la Asesoría del Proyecto.

La CHEC por su parte, con el apoyo de OLADE y Naciones Unidas, desde las primeras fases de la investigación, inició la capacitación del personal nacional en las diferentes disciplinas científicas que participan en los estudios, mediante la participación de éstos en cursos de especialización impartidos en el extranjero, bajo los auspicios de las organizaciones citadas.

El grupo técnico-profesional permanente de la CHEC está conformado por:

- 1 Ingeniero Director
- 4 Ingenieros interventores en las diversas especialidades
- 2 Geólogas interventoras

La capacitación de este personal se ha efectuado en los países que ofrecen cursos internacionales de especialización, tales como: Nueva Zelanda, Colombia, Ecuador, Italia, México.

5. Programa previsto dentro de los próximos cinco años

Las investigaciones geotérmicas programadas en el Macizo Volcánico del Ruiz para los próximos cinco años son las siguientes:

- Fase II - Etapa B: Prefactibilidad con microdetalle
- Fase III: Factibilidad
- Fase IV: Explotación

Fase II - Etapa B

En las áreas de Nereidas-Otún-Volcán Machín, se han previsto los siguientes trabajos:

1. Estudio geotectónico de detalle
2. Prospecciones geoquímicas integrativas
3. Prospección geoelectrica de detalle en las áreas seleccionadas
4. Evaluación e interpretación integrada
5. Localización definitiva de los sitios donde se efectuarán las exploraciones profundas.

Fase III (Para el área que resulte seleccionada)

- Estudio de las exigencias logísticas y elaboración de las especificaciones técnicas de los sitios de perforación.
- Elaboración de los documentos de licitación para la perforación de pozos y adquisición de equipos y materiales.
- Elaboración de las especificaciones técnicas de perforación y alcances del trabajo.
- Perforación de pozos profundos exploración-producción.

- Estudios de evaluación del potencial geotérmico.
- Instalación de una unidad móvil de generación eléctrica a boca de pozo (s).

Fase IV

- Continuación de las actividades de exploración profunda.
- Continuación de la evaluación del potencial geotérmico.
- Definición del esquema de utilización y régimen de explotación.
- Estudios de Ingeniería de Producción.
- Anteproyecto de la primera planta comercial.
- Instalación de la planta comercial
- Estudios sobre usos directos de calor.

6. Perspectiva del Recurso - Incidencia dentro del Sector Energético del país

Colombia posee un enorme potencial hídrico aún inexplorado, lo cual orienta las actividades energéticas preferencialmente hacia los estudios hidroeléctricos. Sin embargo, la evaluación de la secuencia de construcción de los proyectos en el tiempo involucra incertidumbres, tales como la naturaleza aleatoria de los caudales y las fallas inesperadas que se puede presentar en la construcción de las diferentes plantas (hidráulicas y térmicas), haciendo que no sea posible conocer con exactitud la demanda y composición del sistema. Esta situación favorece la oportunidad de satisfacer la demanda de energía eléctrica con proyectos de construcción rápida, menospreciando el costo, el cual en ocasiones puede resultar elevado.

La Central Geotermoeléctrica del Ruiz, una vez instalada, estaría en capacidad de satisfacer la demanda de electricidad a corto plazo, y simultáneamente ahorraría divisas al país, sustituyendo el consumo de carbón por energía ya almacenada en el interior de la tierra.

La demanda de energía eléctrica en el sector del Viejo Caldas (zonas

de suministro CHEC), ha sobrepasado en más del 50% a la capacidad instalada de la CHEC, lo que ha obligado a transportar la energía eléctrica desde regiones remotas del país, con el consiguiente aumento de costos y el incremento de pérdidas a través de las líneas de transmisión.

La energía que produciría la geotermoeléctrica del Ruiz, resolvería en parte tal déficit y a la vez contribuiría a aliviar las demandas del sistema interconectado nacional y reduciría los períodos de racionamiento.

2.3. ESTADO DE LA EXPLORACION GEOTERMICA REALIZADA EN EL PROYECTO BINACIONAL COLOMBO-ECUATORIANO: "TUPIÑO-CHILES-CERRO NEGRO"

Instituto Colombiano de Electrificación, ICEL
Instituto Ecuatoriano de Electrificación, INECEL

1. CRONOLOGIA DE LAS ACTIVIDADES

El interés geotérmico de la zona es conocido en función de los estudios de reconocimiento a nivel nacional, desarrollados en forma individual por los gobiernos de los dos países, con el apoyo técnico y financiero de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). El área de interés prioritaria seleccionada en dicha etapa, se localiza en ambos lados de la línea divisoria que separa a los territorios; por tal motivo los dos gobiernos suscribieron en Bogotá, el 26 de marzo de 1982, un "Acuerdo Complementario del Convenio de Cooperación Técnica y Científica, para la Exploración Geotérmica en el área fronteriza de Chiles-Cerro Negro-Tupiño", mediante el cual se desarrollarían los estudios de exploración geotérmica de las etapas subsiguientes, los cuales estarían bajo la responsabilidad del Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) y del Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL), con el apoyo técnico de OLADE.

Desde sus inicios, los estudios han sido realizados según la Metodología de la Exploración Geotérmica desarrollada por OLADE, la cual se adapta a las características geológicas del Área.

Al momento están concluidos los estudios correspondientes a la Primera Fase de la Prefactibilidad, los cuales fueron realizados por INECEL con asesoramiento de OLADE, en el 1981 y los estudios en territorio Colombiano por el ICEL en el año 1983.

2. RESULTADOS OBTENIDOS

2.1. Situación Geográfica

El área de interés geotérmico en sentido estricto, se sitúa en la frontera Colombo-Ecuatoriana, en el dominio de la Cordillera Occidental de los Andes y está centrada en torno a los aparatos volcánicos recientes Chiles y Cerro Negro. La línea fronteriza pasa por las cumbres de ambos volcanes y divide longitudinalmente en dos mitades el sector de interés geotérmico (Fig. No. 1).

La superficie estudiada constituye una faja de 40 km. de ancho (20 km. a cada lado de la frontera) y está comprendida entre la cumbre de la cordillera occidental y las ciudades de Tulcán e Ipiales, abarcando un área de 1.800 km².

2.2. Características geológicas

El núcleo de la Cordillera Occidental de los Andes está constituido por un complejo ofiolítico cretácico, formado por lavas toleíticas y sedimentos pelágicos. Este conjunto se encuentra plegado, fallado y débilmente metamorfizado. Sobre éste y en fuerte discordancia angular y erosiva, existe una potente formación volcánica constituida por una secuencia continua de lavas y aglomerados hasta de 1000 metros de espesor, que ocupa a modo de plancha la porción más elevada de la Cordillera. Estas volcanitas han sido datadas durante el Reconocimiento hecho por INECEL-OLADE, en 4.78 ± 0.5 m.a., edad que los ubica en el Plioceno. Finalmente sobre una superficie de erosión glacial excavada en la secuencia pliocénica, se disponen varios edificios volcánicos cuaternarios entre los que se destacan el Chiles (4768 m.s.n.m.) y Cerro Negro (4470 m.s.n.m.).

La sucesión de episodios eruptivos en cada uno de los dos aparatos muestran grandes similitudes, sugiriendo una historia común, vinculada con una cámara magnética única, lo cual sería la consecuencia de estar

emplazados sobre la misma fractura transversal y a corta distancia entre sí. La sucesión puede resumirse de la siguiente manera:

La actividad se inicia con la construcción de dos estratovolcanes de productos poco diferenciados (andesitas piroxénicas), hace aproximadamente 160.000 años según una datación radiométrica obtenida durante el Reconocimiento INECEL-OLADE, para el Volcán Chiles. Después de un lapso de inactividad y en el que tiene lugar la erosión glaciaria de los aparatos, se reanuda la actividad volcánica formándose los conos actuales, hace aproximadamente 35.000 años, dato promediado de dataciones realizadas en el Reconocimiento citado. Los productos emitidos en este período y todavía conservados a pesar de la erosión glaciaria, son fundamentalmente lavas, las cuales presentan variaciones composicionales, desde dacitas como productos iniciales hasta andesitas olivínicas como productos finales. Esta evolución es más notoria en el Chiles, en tanto que en el Cerro Negro la actividad se interrumpe con el desalojo de los productos más diferenciados. En época reciente, la reanudación de la actividad probablemente en épocas históricas, se ha manifestado por medio de explosiones freatomagnéticas.

2.3. Características geoquímicas

El tipo químico más frecuente de las aguas en el área de los volcanes Chiles y Cerro Negro es el bicarbonato-alkalino térreo, al interior del cual se reconocen varios subgrupos dependiendo de su salinidad, temperatura y la presencia parcial del anhídrido carbónico, todas dentro del marco de los acuíferos someros. La existencia de acuíferos profundos se confirma por la contaminación de las aguas superficiales, con aguas cloruradas con una relación alta de Li/Cl. El bajo porcentaje de estas aguas cloruradas no permite un estudio geotermométrico cuantitativo, sin embargo la distribución de las anomalías de temperatura y anhídrido carbónico en las aguas superficiales, sugiere la presencia de una anomalía térmica regional.

2.4. Consideraciones geotérmicas

La presencia en esta zona, de una elevada anomalía térmica está indicada por los siguientes elementos:

- a. La persistencia de actividad volcánica a partir de unos 160.000 años hasta la actualidad.
- b. La presencia de una cámara magnética superficial situada probablemente, a una profundidad de 2-3 km., alimentada de modo casi continuo al menos en los últimos 35.000 años. El volumen mínimo de esta cámara se ha estimado igual a unos 5.5 km³. La reconstrucción de la anomalía térmica inducida en las rocas encajantes sugiere temperaturas suficientes para la formación de un sistema geotérmico de alta entalpía a profundidades del orden de 1 km.
- c. La existencia de una extensa zona de alteración hidrotermal y de cráteres de explosión freática, atestiguan que en el pasado reciente se formaron bolsones de vapor bajo presión.
- d. La presencia de claras anomalías de temperatura en las aguas termales de la zona, que pertenecen a los circuitos superficiales de circulación, confirman un elevado flujo de calor terrestre.

Los aparatos recientes del Chiles y del Cerro Negro están directamente apoyados sobre el paquete de lavas terciarias que, a su vez, recubre el basamento de la cordillera occidental. El reservorio debería estar ubicado en la secuencia lávica pliocena. (Fig. 2). El límite inferior probable lo forman los sedimentos plegados de tipo flysh pertenecientes al Complejo Ofiolítico.

La permeabilidad es de tipo fisural, inducida tanto por las fracturas transversales WNW-ESE como las fallas longitudinales NNE-SSW, todas ellas subverticales.

La geometría del reservorio parece diseñar una banda subvertical de gran amplitud, correspondiente a la transversal WSW-ESE, con ensanchamientos en el cruce de las fallas longitudinales. Esta

configuración está inferida de la posición de las fracturas y de la distribución de alteración hidrotermal.

Desafortunadamente no se dispone de datos geoquímicos relativos a los acuíferos profundos. Todas las manifestaciones termales de la zona están, de hecho, alimentadas por aguas superficiales que eventualmente muestran una débil contaminación con aguas de circuitos profundos. Esto sugiere que los acuíferos profundos permanecen confinados en el interior por una eficiente cobertura impermeable y que las fugas hacia la superficie son encubiertas por un importante flujo superficial de agua meteórica.

La falta de afloramientos de productos piroclásticos, debida a la erosión glaciaria, ha impedido por otra parte, la recolección de información directa sobre la naturaleza y temperatura del subsuelo, a través del estudio de los xenolitos y su alteración hidrotermal.

La recarga puede realizarse a través de las fallas longitudinales, puesto que éstas constituyen franjas de alta transmisividad que drenan las áreas de mayor pluviosidad de la cordillera occidental y por infiltración a través de las lavas recientes, cráteres y conductos de alimentación de la cumbre de los dos volcanes.

La capa sello que confina el sistema, es probablemente debida a un mecanismo de self-sealing. En superficie es parcialmente visible en las formaciones más antiguas, las cuales muestran alteración hidrotermal intensa (caolinización, piritización) en la proximidad de las grandes fracturas; esta alteración afecta también, aunque en mucho menor grado, a rocas del Chiles y Cerro Negro.

3. PROBLEMAS ENCONTRADOS

- a. Escases casi absoluta de datos geocientíficos básicos en el ámbito

de los terrenos volcánicos, lo cual obligó a realizar extensos levantamientos geológicos regionales

- b. Escases de laboratorios para realización de análisis químicos, dataciones, etc., en la región y elevado costo de los mismos, lo que condiciona en gran parte los programas de investigación.
- c. Dificultad de obtener financiamiento para mantener la continuidad en los estudios.

4. PRINCIPALES NECESIDADES

- a. Incremento del personal nacional.
- b. Intercambio continuo de experiencias con profesionales de otros países de la región, involucrados en las actividades geotérmicas.
- c. Obtención periódica de información científica básica.
- d. Capacitación permanente del personal.

5. RECURSOS HUMANOS

El grupo profesional que participa el Proyecto Binacional está integrado por:

- Por ICEL, Colombia: 2 ingenieros especialistas en geotermia, un geólogo y un geoquímico.
- Por INECEL, Ecuador: 1 ingeniero especialista en geotermia, un geólogo-vulcanólogo, un geólogo-geofísico, un geólogo-geoquímico y un geólogo.

6. PROGRAMAS PREVISTOS

Según lo estipulado en el Convenio de Cooperación Técnica suscrito entre los dos países, al momento OLADE se encuentra gestionando el financia-

miento no reembolsable, para la ejecución de los estudios de la Segunda Fase de la Prefactibilidad, estimándose su iniciación a fines del primer trimestre de 1984.

De conformidad con el mencionado Convenio, los estudios continuarán en sucesivas etapas de la Exploración según la Metodología OLADE, luego de evaluarse los resultados obtenidos en la Segunda fase.

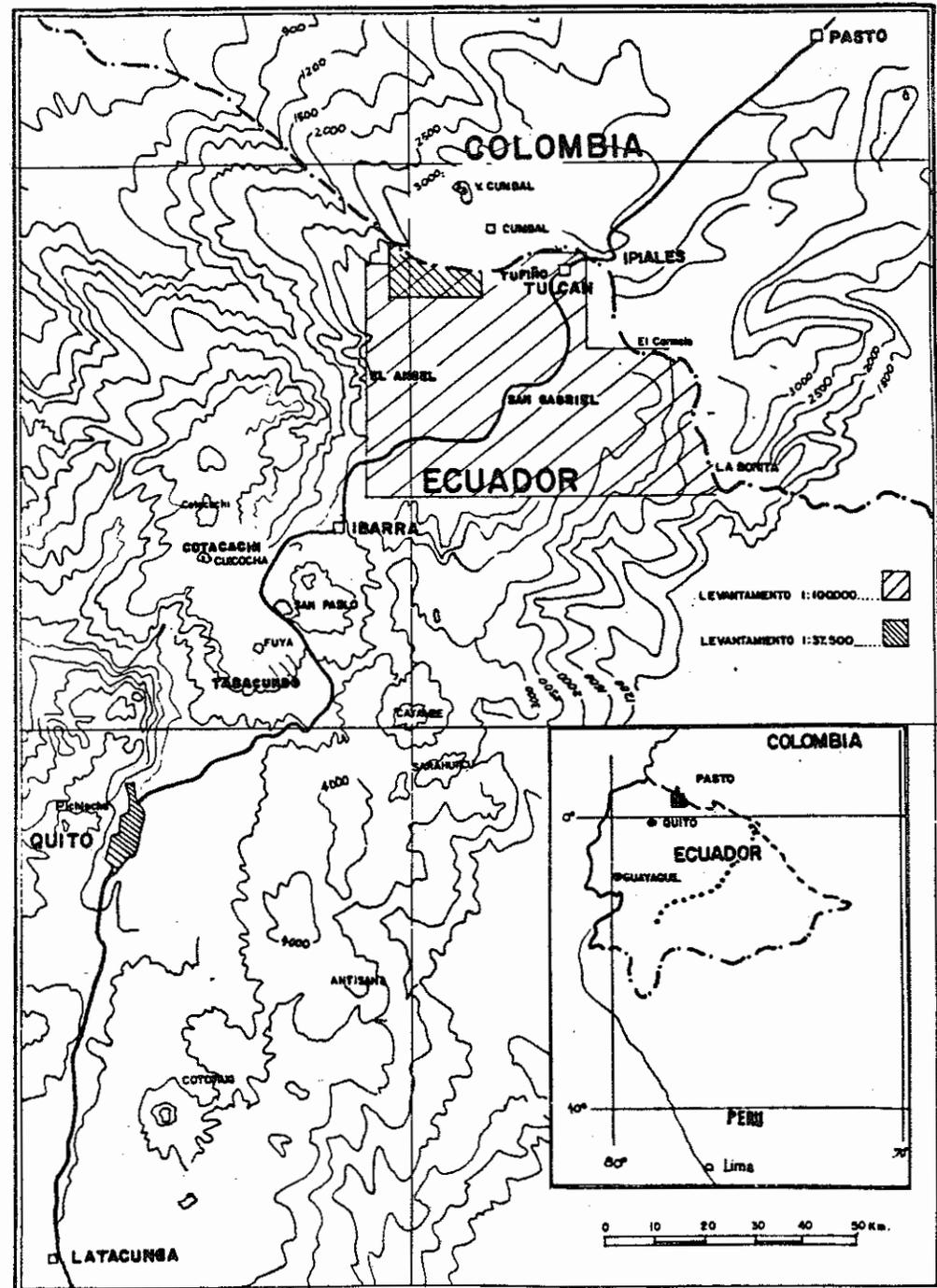


FIG. 1.- Mapa de situación.

2.4. "INVESTIGACIONES GEOTERMICAS REALIZADAS Y SU SITUACION FUTURA"

Instituto Costarricense de Electricidad, ICE
San José, Costa Rica

1. SINTESIS CRONOLOGICA DE LAS ACTIVIDADES RELATIVAS A LA INVESTIGACION GEO- TERMICA EFECTUADAS EN COSTA RICA

Las investigaciones geotérmicas en Costa Rica están a cargo del Instituto Costarricense de Electricidad (I.C.E.).

Exceptuando unos pocos trabajos con carácter de reconocimiento efectuados durante la década de los 60, las investigaciones geotérmicas tuvieron inicio en forma intensa y sistemática a partir de 1975, como consecuencia de la crisis energética de 1973 y de la incontrolada elevación de los precios del petróleo y de sus derivados a que ésta dio origen. Fue a partir de ese año que se inició el estudio multidisciplinario de una zona con un área superior a los 500 km², localizada en la vertiente del Pacífico de la Cordillera Volcánica de Guanacaste (parte noroeste del territorio costarricense), ver Fig. 1.

El área investigada que se muestra en la Figura No. 1, se desarrolla en el flanco Sur de la citada cordillera, cubriendo una franja de unos 16 km. de ancho por 30 km. de largo, entre las elevaciones de 80 y 900 m. sobre el nivel del mar. Inicialmente (durante 1975), los trabajos fueron realizados siguiendo los lineamientos sugeridos por funcionarios de la Comisión Ejecutiva del Río Lempa (CEL), de El Salvador. Posteriormente, se contrataron, por medio de un concurso Internacional, los servicios de las firmas Rogers Engineering y Geotherm-EX de los Estados Unidos, con la asesoría de los cuales se trabajó hasta 1981.

Una vez finalizado el contrato con las dos firmas norteamericanas citadas, se realizó un nuevo concurso Internacional para la contratación de una firma consultora para las subsiguientes fases del proyecto, el cual fue adjudicado en 1982 a la firma Electroconsult de Italia.

Los trabajos realizados hasta la fecha han sido divididos en dos fases, a saber:

Fase I o de Previabilidad

Tuvo una duración de dos años (1975 y 1976), durante los cuales se efectuaron los siguientes trabajos: mapeo geológico, geoquímica de aguas y gases, perforación de agujeros para reconocimiento estratigráfico y medición de gradiente térmico, prospecciones geoelectricas y gravimétricas y recolección de datos meteorológicos e hidrológicos. Al finalizar esta fase, fue presentado un informe de previabilidad técnica, el cual se articuló en seis anexos (uno por cada una de las disciplinas científicas utilizadas durante esta fase).

Con este informe se llegó a la conclusión que de las áreas estudiadas, la llamada Las Hornillas en las faldas del Volcán Miravalles, representaba la zona de mayor interés para realizar en ella perforaciones profundas de exploración, con la idea de llegar a determinar la factibilidad de explotar comercialmente un campo geotérmico en la zona.

Fase II o de Prefactibilidad avanzada

Una vez concluida la fase anterior y con base en el informe que de ella se obtuvo, se pasó a la fase II, la cual consistió en el estudio detallado de un área de unos 16 km². y en la perforación de tres pozos profundos.

Durante esta fase se perforaron y probaron tres pozos de unos 1300 mts. de profundidad, los cuales dieron potencias de 6, 1, y 7 MW, respectivamente. La información obtenida ha sido procesada para la preparación

de un informe, el cual actualmente se encuentra en fase de edición y que constituye un informe de pre-factibilidad avanzado para la primera unidad geotermoeléctrica de 55 MW que se proyecta entrará en operación hacia fines de 1988.

La próxima fase a realizar en el campo Miravalles, se explicará más adelante en la parte 6, en la que se trata de las actividades a realizar durante los próximos 5 años.

Las actividades llevadas a cabo durante las Fases I y II, fueron financiadas con préstamos del BID.

2. ESTADO DE LOS ESTUDIOS GEOTERMICOS REFERIDOS A LA METODOLOGIA DE OLADE

Los estudios de las fase preliminar y prefactibilidad del Proyecto Geotérmico Miravalles, se iniciaron en 1975 y se concluyeron en 1976. La metodología de OLADE, cuya discusión se inició en 1977, se publicó por primera vez en 1979, obviamente no fue seguida en los estudios citados. Sin embargo, se puede decir en términos generales, que la metodología utilizada no se aparta mucho de la recomendada por OLADE, excepto que no se dió el énfasis necesario al aspecto geovulcanológico.

Además de los estudios que se realizan en el campo geotérmico Miravalles, existe otro proyecto para el estudio de los recursos geotérmicos del territorio costarricense, que se planea llevar a cabo con la ayuda de las Naciones Unidas y el Gobierno de la República de Italia; éste consta de dos partes que son las siguientes:

Fase I

Evaluación a nivel de reconocimiento de los recursos geotérmicos sobre un área de aproximadamente 25.000 km². Esta área corresponde a la mitad del territorio Costarricense. (Ver Fig. No. 2). La duración de los trabajos relativos a esta fase se estima en un año; su inicio se

prevé para 1985 y requerirá de la participación de personal local, así como la asesoría de consultores extranjeros.

Fase II

Para la segunda etapa de este programa, cuyo inicio ha sido fijado tentativamente para 1986, al igual que para la Fase I ha sido prevista una duración de un año. Esta fase consistirá en los estudios de prefactibilidad de una o dos áreas a definir con base en los estudios a realizar durante la fase I, o de reconocimiento.

Estos estudios consistirán en la prospección de detalle en una o dos áreas, con una extensión total estimada de 500 km²., cuyo objetivo será la localización de áreas cuyas características puedan corresponder a reservorios geotérmicos de alta entalpía y comercialmente explotables. Para la realización de los estudios relativos a esta fase está prevista la participación de personal costarricense junto con la asistencia de consultores especializados.

En el punto seis se dá el detalle de los trabajos a realizar en cada una de esta fases.

En ambas etapas se seguirá una metodología similar a la recomendada por OLADE.

3. PRINCIPALES PROBLEMAS QUE HAN AFECTADO EL DESARROLLO DE LOS RECURSOS GEOTERMICOS

Los principales problemas afrontados durante las fases de desarrollo del recurso geotérmico completadas hasta la fecha en el campo Miravalles, son de carácter financiero, técnico y operacional.

a. Financiero:

La fuente de financiamiento utilizada para los estudios geotérmicos proviene principalmente de los bancos de desarrollo y ha sido otorgada lógicamente por etapas.

Como en Costa Rica los trámites de aprobación de estos préstamos toman mucho tiempo, se ha producido necesariamente una interrupción entre cada una de las etapas sucesivas. Estas interrupciones ocasionan una pérdida de continuidad en los trabajos y propician la fuga de personal especializado. Aunque se comprende y acepta la necesidad del financiamiento por etapas, podría pensarse en la posibilidad de préstamos que contemplen varias etapas, por ejemplo de preliminar a factibilidad, manteniendo los bancos la potestad, si las condiciones del campo no son convenientes para su desarrollo comercial, de finalizar el financiamiento de los estudios en la etapa en que se demostrará que no es conveniente seguir adelante.

b. Técnico:

Dificultades inherentes a la complejidad estructural de las zonas en estudio.

Problemas de acceso y de ejecución para prospecciones geofísicas, en especial para los perfiles de resistividad eléctrica y gravimetría.

Dificultad de acceso para equipos de perforación, en la ejecución de sondeos para medición de gradientes térmicos, reconocimiento estratigráfico y grado de alteración hidrotermal de las rocas.

Emigración del personal que adquiere experiencia hacia otras áreas de empleo, más cercanas a las ciudades y con horarios de trabajo más favorable. Este problema se ha manifestado con particular intensidad durante la suspensión de los trabajos, producida al completarse cada una de las fases de estudio

c. Operacional:

- Para la fase de prefactibilidad:

Debido a la demanda existente en ese momento en el mercado mundial de perforación para la búsqueda de hidrocarburos, se encontró dificultad para la contratación de equipos de perforación.

- Para la fase de factibilidad:

Carencia de un separador ciclónico transportable para las pruebas de producción.

Falta de equipo para pruebas de interferencia.

Falta de equipo para mediciones de caudal dentro de los pozos (down hole flow meter).

4. PRINCIPALES NECESIDADES

Las principales necesidades para la realización de las próximas etapas del proyecto geotérmico de Costa Rica son las siguientes:

- a. Personal especializado para la próxima fase del Proyecto Miravalles
- b. Personal especializado necesario para hacer frente al reconocimiento a nivel nacional y viabilidad programadas (Ver parte sexta).

Es necesario hacer notar que todo el personal indicado, es personal nuevo, adicional al ya existente en el ICE. Este personal, es el necesario para completar los cuadros operacionales de cada una de las fases de próxima ejecución y deberá recibir entrenamiento. Aún cuando el entrenamiento podría ser impartido durante la fase inicial de los trabajos a realizar, es evidente que la adopción de una solución de es-

te tipo originará atrasos y dificultades en la ejecución de los trabajos programados. Lo recomendable es que la selección del nuevo personal sea hecha con la debida anticipación y que previo al inicio de los trabajos, sea enviado a seguir algunos de los cursos que sobre geotermia se dictan periódicamente en instituciones especializadas.

c. Equipo

- c.1. Para la fase III y las subsiguientes del Proyecto Miravalles se prevé la implementación de un equipo químico especializado en laboratorio y campo. Equipo petrográfico: microscopio y de preparación de láminas delgadas, equipo de medición en los pozos.

Todos los equipos citados se consideran necesarios. En la medida que no fuera posible adquirir alguno de ellos a través de la fuente de financiamiento citada, sería necesario obtenerlo por otra vía.

Un equipo de perforación (completo de todas sus partes y equipos adicionales). Este equipo es necesario para cubrir las necesidades de pozos para alimentar las unidades I y II y eventuales operaciones de mantenimiento de pozos. En el caso de que no se llegase a adquirir, será necesario contratar oportunamente una segunda máquina perforadora por medio de una licitación internacional.

- c.2. Equipo necesario para las fases de reconocimiento y factibilidad del proyecto geotérmico regional sobre el territorio costarricense.

Equipo químico para laboratorio y campo, equipo para laboratorio de rocas. Además se necesitan unidades de transporte de doble transmisión y de transmisión normal.

5. RECURSOS HUMANOS DISPONIBLES

Después de casi 9 años de exploración de los recursos geotérmicos en Costa Rica, existe personal profesional que ha estado en alguna medida relacionado con las investigaciones geotérmicas y que ha participado en cursos específicos de entrenamiento relacionados con el aprovechamiento de esta energía:

- a. Personal que ha seguido el curso que anualmente se dicta en Pisa, Italia: en total 6 profesionales.
- b. Personal que ha recibido entrenamiento en cursos cortos y en otros campos geotérmicos: en total 10 profesionales.
- c. El personal técnico que ha colaborado en las prospecciones geológicas, geofísicas y geoquímicas se estima en unas 50 personas.
- d. Profesionales que han participado en la fase de reconocimiento: 7 en total.
- e. Profesionales que participaron en la fase de prefactibilidad: 13 en total

En resumen, se puede concluir que existen en Costa Rica, los siguientes profesionales con experiencia en geotermia:

- 5 Químicos
- 4 Ingenieros
- 3 Geólogos
- 2 Geofísicos
- 1 Ingeniero Mecánico
- 4 Ingenieros Técnicos
- 50 entre técnicos de laboratorio, asistentes de geología, técnicos electrónicos.

6. PROGRAMA DEL DESARROLLO GEOTERMICO PARA EL PERIODO 1984 - 1989

- Campo Geotérmico Miravalles. Para el próximo quinquenio, gran parte de la actividad geotérmica, estará concentrada en este campo, en donde las actividades a desarrollar son las siguientes:
 - Perforar nuevos pozos de exploración-producción.
 - Completar informe factibilidad I unidad de 55 MW.
 - Construcción I unidad.
 - Preparar informe de factibilidad II unidad de 55 MW.
- Proyecto Geotérmico Regional

Etapa de Reconocimiento: Se desarrollará sobre el área que por su origen geológico, historia tectónica y condiciones hidrológicas re presente un ambiente favorable desde el punto de vista geotérmico. Esta área comprende las principales cordilleras volcánicas del país y representa aproximadamente la mitad del territorio nacional (25.000 km²).

Los objetivos a cubrir durante el estudio de reconocimiento son los si guientes:

Trabajos de campo que incluirán:

- Geología, Tectónica, Estratigrafía, Vulcanología, Petrografía, Hidrogeología.
- Geoquímica de agua, gases y mineralizaciones.
- Análisis de laboratorio químico, isotópicos y petrográficos.
- Interpretación conclusiva de los datos de campo y bibliográficos para reconstrucción de modelos geotérmicos regionales.

- Evaluación preliminar del recurso geotérmico en las áreas de mayor interés.
- Informe de Reconocimiento.

Etapa de Prefactibilidad: con base en los resultados que se obtendrán de la fase anterior, se elegirán una o dos zonas entre las más prometedoras, en un área de unos 500 km², para realizar en ellas estudios de prefactibilidad tendientes a demostrar si es factible o no un desarrollo geotérmico de tipo industrial. No habiendo sido previsto hasta la fecha ningún aprovechamiento para los recursos geotérmicos de baja y media entalpía, esta prefactibilidad buscará formas de alta en talpía aptas para la generación de electricidad.

Los estudios a realizar durante esta etapa son los siguientes:

Geología y Vulcanología de detalle

Geoquímica de detalle

Hidrogeología de detalle

Geofísica, principalmente resistividad eléctrica, gravimetría y flujo de calor.

Perforación de pozos de reconocimiento estratigráfico, medición de gra diente térmico (cuyo número y profundidad deberán ser definidos en la fase anterior).

Análisis de laboratorio sobre muestras de agua, gases, rocas.

Con base en los datos que suministrarán las disciplinas involucradas se preparará un informe de prefactibilidad, mediante el cual se seleccionarán una o dos áreas en las cuales efectuar perforaciones profundas para investigación-desarrollo.

7. IMPORTANCIA DE LA GEOTERMIA COMO FUENTE DE ENERGIA

Costa Rica, a pesar de poseer una extensión territorial pequeña (50.900 km².) cuenta, gracias a su relieve montañoso y a su clima, con importantes reservas hidroeléctricas, estimadas en 9.000 MW; de las cuales en la actualidad ha sido explotado un 7%. A pesar de existir tan abundante recurso energético, la topografía de altas montañas, a la vez que favorece la explotación de este recurso con altas caídas, dificulta la construcción de grandes embalses que permitan regular anualmente la generación hidroeléctrica, acumulando los excesos de agua durante las épocas de lluvias, para utilizarlos durante la época seca. Esta condición obligó a adoptar un sistema mixto, basado en plantas hidro y térmicas, el cual resultó ser el más económico mientras que el precio de los combustibles derivados del petróleo se mantuvo bajo, es decir hasta antes de la crisis energética de 1973.

A partir de esta fecha, la economía costarricense, gradualmente iba siendo asfixiada al aumentar el costo del petróleo y sus derivados. Ante esta realidad y ante lo incierto del mercado internacional, el sector de planeamiento del Instituto Costarricense de Electricidad orientó sus programas de desarrollo, hacia la utilización de los recursos geotérmicos con las cuales se puede llegar a sustituir el complemento térmico convencional requerido por las plantas hidroeléctricas. El futuro inmediato de la energía geotérmica, con base exclusivamente en las potencias que se programa instalar en el campo geotérmico Miravalles para finales de la década actual, permite estimar que aproximadamente un 15% de la electricidad producida será de origen geotérmico. Más adelante las previsiones se hacen inciertas; sin embargo, de mantenerse las actuales condiciones de crecimiento del mercado, para finales de siglo, el porcentaje anterior podría subir hasta un 30%.

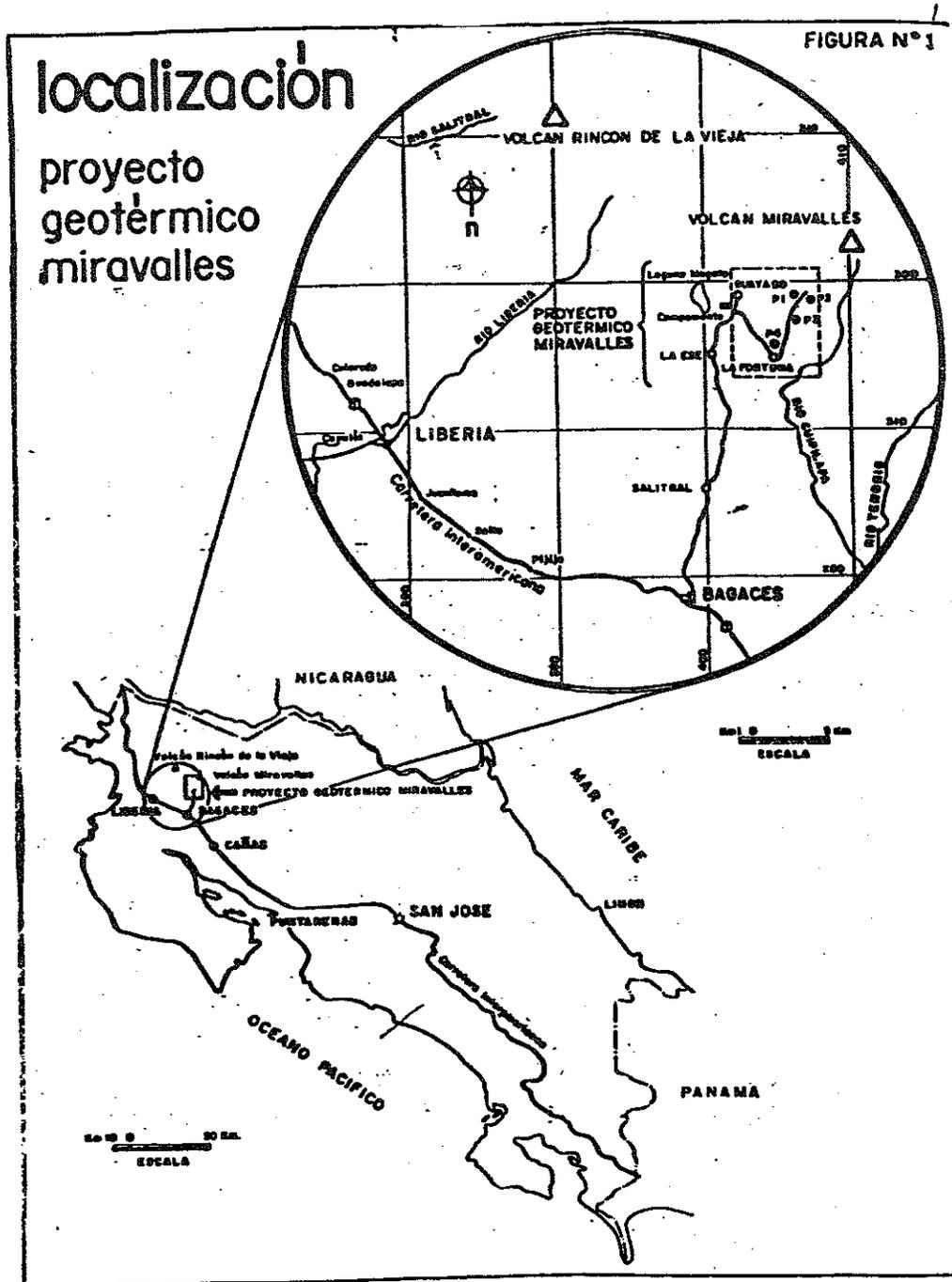




FIGURA N. 2

2.5. "ESTADO ACTUAL DE LA GEOTERMIA EN CHILE"

Servicio Nacional de Geología y Minería
Santiago, Chile

1. INTRODUCCION

El desarrollo económico exige disponer de energía en cualquiera de sus formas principales: carbón, petróleo, electricidad. Por consiguiente, los países deben desarrollar en forma anticipada sus fuentes energéticas para atender la demanda creciente de las complejas actividades del mundo actual.

A pesar de que la energía geotérmica ha tenido un desarrollo un tanto lento, su utilización ha adquirido un fuerte incremento, especialmente en aquellos países que han tenido la visión de iniciarse en estas técnicas con la debida anticipación. Este aumento de la utilización de los recursos geotérmicos, principalmente en la generación de energía eléctrica, se debe a que sus costos resultan altamente competitivos y el progresivo agotamiento de los recursos no renovables que contribuyen a generar energía.

Chile, por sus características geológicas, es un país privilegiado en cuanto a sus posibilidades de recursos geotérmicos, a lo largo de toda la cadena de actividad magnética de la Cordillera de Los Andes. Las investigaciones al respecto se han desarrollado principalmente en la región andina del sector norte del país.

El presente trabajo constituye un resumen de algunos informes consultados referentes a estudios geotérmicos realizados en Chile e informa

ciones verbales de geólogos e ingenieros. Se agradece especialmente la colaboración prestada por el ingeniero Claudio Cádiz y los geólogos Alfredo Lahsen, Margarita Letelier y Nicolás Marinovic.

2. SINTESIS CRONOLOGICA DE LA GEOTERMIA EN CHILE

El interés por estudiar y desarrollar industrialmente los recursos geotérmicos en Chile, data desde principios de siglo, cuando en 1908 se formó en la ciudad de Antofagasta una sociedad privada para explotar los géiseres de El Tatio. Sólo en 1921 se realizaron 2 pozos exploratorios de aproximadamente 60 m. de profundidad, fluyendo a lo menos uno de ellos, por alrededor de 30 años.

Pero es a partir de principios de 1968 cuando se inician las exploraciones geotérmicas sistemáticas, como resultado de un convenio suscrito entre el Gobierno de Chile y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (P.N.U.D.). Para llevar a cabo este convenio, la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), como organismo gubernamental participante creó el Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica, cuya función principal fue la prospección, explotación y evaluación de los recursos geotérmicos del país.

En la primera etapa de los estudios, las exploraciones se restringieron a la I y II Regiones del Norte de Chile, cubriendo un área de 108.000 km²., comprendidos entre 18° y 25° de Latitud Sur y al Este de 69° 30' de Longitud Oeste, por ser esta región la más deficitaria en recursos energéticos e hídricos del país. (Fig. 1). Para tales exploraciones se empleó el criterio de estudiar todas aquellas áreas que presentasen evidente actividad termal superficial.

Los estudios se iniciaron con una exploración sistemática del campo geotermal El Tatio, ya que de esa área se disponía de antecedentes que justificaban prospecciones de detalle. Simultáneamente con los estudios de El Tatio, se realizaron exploraciones preliminares en varias áreas

con manifestaciones termales situadas en la I y II regiones.

A raíz de los antecedentes obtenidos de estas exploraciones, se determinó que las áreas más favorables para ser desarrolladas en orden prioritario, además de El Tatio eran: Puchuldiza, Surire o Suriri y Pampa Lirima. Las demás áreas geotermales presentaron características químicas y condiciones geológicas poco favorables como para ser desarrolladas económicamente con propósitos geotermoeléctricos.

En El Tatio y Puchuldiza se realizaron estudios de detalle que incluyen geología, geoquímica, geofísica, termometría y sondajes. En Surire y Pampa Lirima se han efectuado estudios muy preliminares de geología, geoquímica, termometría y algunas mediciones geofísicas en el caso de Pampa Lirima.

En 1975 se llevó a cabo un estudio de factibilidad en El Tatio, que arrojó resultados positivos para su explotación con el propósito de generar energía eléctrica. Posteriormente, en 1978, la CORFO hizo un llamado internacional para precalificación de proponentes. Cada proponente debía constituirse como un consorcio compuesto de: a) una entidad financiera; b) una empresa consultora de energía geotérmica y c) un fabricante de equipos.

Varios países acudieron a este llamado, entre ellos Japón, EE.UU., Nueva Zelandia e Italia, preseleccionándose 10 consorcios de un total de 14. La decisión final no se adoptó, ya que el gobierno chileno a través del Consejo Superior de CORFO decidió que lo más adecuado era entregar el proyecto a la iniciativa privada, considerando la orientación de la política económica vigente y que el proyecto era técnicamente factible.

El Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica cesó sus actividades en Marzo de 1982 y desde entonces no se realizan trabajos en el campo de la geotermia.

Actualmente, la CORFO prepara una licitación del proyecto El Tatio en su totalidad, que incluye: pertenencias minerales, instalaciones de campamento, 13 pozos geotérmicos (6 exploratorios y 7 de producción) y toda la información tecnológica incluida en más de 100 estudios.

3. ESTADO ACTUAL DE LAS INVESTIGACIONES EN LAS DIFERENTES AREAS

La generalidad de las áreas con actividad geotermal investigadas en el Norte de Chile, (Fig. 1 y Tabla 1), se ubican en una franja volcánica, de edad Plioceno-Cuaternario, que se desarrolla a lo largo de la Cordillera de Los Andes, lo que permite suponer que la fuente de calor que genera la actividad geotermal proviene de este magmatismo reciente.

El volcanismo Plioceno-Cuaternario ha sido alimentado principalmente a través de fallas de tensión orientadas aproximadamente N-S y por sistemas secundarios NW-SE y NE-SW, producto de una tectónica distensiva de grandes desplazamientos diferenciales de bloques. La contemporaneidad de estos eventos ha permitido en algunos lugares de la Cordillera de Los Andes, la formación de estructuras (grábenes) y unidades litológicas favorables para la existencia de sistemas geotérmicos con posibilidades económicas.

En Chile, las áreas geotermales que cuentan con la mayor cantidad de estudios son: El Tatio, Puchuldiza y Surire. En el resto de áreas que presentan manifestaciones termales, solamente se han realizado investigaciones muy preliminares.

Campo Geotérmico de El Tatio

El campo geotérmico de El Tatio está situado en el extremo nororiental de la II Región de Antofagasta, a 4.300 m.s.n.m.

Geológicamente se encuentra emplazado en rocas volcánicas del Cenozoico Superior, dispuestas sobre un basamento de sedimentos continentales Cre-

AREAS DE ACTIVIDAD GEOTERMAL EN LAS REGIONES DE
TARAPACA Y ANTOFAGASTA*

TABLA No. 1

AREA GEOTERMAL UBICACION	ALTURA (m.s.n.m.)	ACTIVIDAD SUPERFICIAL	TEMPERATURA (°C)
Jurase 18°12'S-69°32'W	4.000	Vertientes calientes, alteración hidro- termal y depositación de sílice	68'
Untupujo 18°13'S-69°17'W	4.350	Vertientes tibias	12-15
Churiguaya 18°20'S-69°12'W	4.400	Vertiente tibia	14
Surire ° 18°55'S-68°59'W	4.300	Fumarolas, vertientes y pozas de agua caliente. Depósitos de sinter y fuer- te alteración hidrotermal	20-86
Polloquere 18°54'S-68°59'W	4.300	Vertientes calientes, depósitos de sinter	18-65
Chinchillani 19°08'S-68°55'W	4.200	Vertientes calientes, zonas alteradas	10-30
Enquelca 19°15'S-68°47'W	3.750	Vertientes calientes	31

AREA GEOTERMAL UBICACION	ALTURA (m.s.n.m.)	ACTIVIDAD SUPERFICIAL	TEMPERATURA (°C)
Berenguela 19°12'S-69°12'W	3.775	Pozas calientes	58
Quitariri 19°20'S-69°30'W	3.935	Vertientes calientes	76-87
Puchuldiza ° 19°23'S-69°01'W	4.250	Géiseres, fumarolas, vertientes y pozas calientes: fuerte alte- ración y depósitos salinos	86
Chusmiza 19°41'S-69°12'W	3.350	Vertiente caliente	40
Pampa Lirima 19°51'S-68°56'W	3.900	Vertientes y pozas calientes, depósitos salinos	40-73
Colpagua 19°53'S-68°38'W	3.800	Vertientes calientes	44
Mamifa 20°04'S-69°13'W	2.750	Vertientes calientes	45
Pica 20°28'S-69°20'W	1.400	Vertientes calientes	34

AREA GEOTERMAL. UBICACION	ALTURA (m. s. n. m.)	ACTIVIDAD SUPERFICIAL	TEMPERATURA (°c)
Ascotán 21°36'S-68°15'W 21°42'S-68°14'W	3.780	Vertientes calientes, depósitos salinos	25-33
El Tatio ° 22°20'S-68°01'W	4.300	Géiseres, fumarolas, vertientes, pozas de agua y barro hirvientes, alteración hidrotermal y depósitos de sinte	86 °
Alitar 23°08'S-67°39'W	4.690	Vertiente y pozas de agua caliente Fuerte alteración	37-66
Aguas Calientes 23°32'S-67°35'W	4.400	Vertientes y pozas tibias	15-27
Tilopozo 23°48'S-68°15'W	2.300	Vertientes tibias y depósitos de sinte	25-27
Tuyajto 23°57'S-67°36'W	4.040	Vertientes calientes	28-33

* Tomado de Comité Geotérmico 1978, 1978a; LAHSEN, 1976, 1976a.

° Areas con mayor desarrollo de estudios geotérmicos

tácicos, en un graben de orientación norte-sur (grietas Tatio), originado por los movimientos distensivos del Plioceno-Reciente, responsables en gran medida del alzamiento de Los Andes.

La actividad hidrotermal superficial del campo está circunscrita a un área de aproximadamente 10 km². La mayoría de las fuentes termales emergen en las partes bajas del graben Tatio e incluyen géiseres, fumarolas, vertientes y pozas calientes de agua y barro. La temperatura de las fuentes alcanza 86°C, la cual corresponde al punto de ebullición del agua a esa altura. Por métodos directos se estimó que la pérdida de calor total del campo es cercana a 26×10^6 cal/seg.

Estudios geoquímicos determinaron que el agua caliente y el vapor descargado por las manifestaciones termales y pozos perforados, corresponden a una solución cercanamente neutra, cuyos componentes mayores son NaCl, KCl, CaCl₂, B y SiO₂. Además, existen altas concentraciones de Li, Cs y Rb. Los principales gases disueltos son H₂S y CO₂.

En este campo también se realizaron prospecciones geofísicas basadas solamente en métodos geoelectrónicos, con el propósito de determinar la extensión en sub-superficie del reservorio geotermal. Tales prospecciones indicaron una anomalía de resistividad de aproximadamente 30 km². de extensión, para una resistividad aparente inferior a 10ohm/m, a una profundidad cercana a 1.000 m., y dentro de ésta, otra zona anómala de unos 14 km². con una resistividad de 5 ohm/m.

Las anomalías geofísicas fueron constatadas con la perforación de 13 pozos. Entre 1969 y 1971 se perforaron 6 pozos de exploración de 4 pulgadas de diámetro y 600 m. de profundidad promedio, que permitieron ubicar diferentes acuíferos a temperaturas entre 210° y 240°C. Posteriormente, entre los años 1973 y 1974 se perforaron 7 pozos de desarrollo de 8 pulgadas de diámetro, con profundidades variables entre 900 y 1815 m., de los cuales 3 son productores y los 4 restantes no fluyen o lo hacen en forma temporal. Con estos pozos se detectó una zona productora de alta entalpía (250°- 260°C), a una profundidad de 750 a 900 m. de profundidad.

Considerando que el extremo norte de Chile es tan deficitario, tanto en recursos hídricos como energéticos, y ante el hecho de que, el fluido

captado en El Tatio tiene la temperatura suficiente para producir su propia evaporación, se firmó en 1971 un convenio de cooperación técnica con el Reino Unido, para efectuar un estudio de factibilidad técnica para la desalinización del vapor geotermal de este campo y diseñar una planta piloto, con una producción de 0.25 l/seg. de agua dulce y una alimentación de 0,50 l/seg.

Las experiencias llevadas a cabo en esta planta entre Octubre de 1974 y Abril de 1975, permitieron demostrar la factibilidad técnica de producir agua dulce, estudiar las posibilidades de diseño de una planta industrial y obtener algunos antecedentes acerca de la recuperación de elementos tales como Li, Cs, Rb y K presentes en las salmueras resultantes.

En 1975, con el propósito de decidir las inversiones y programas de desarrollo futuro, Naciones Unidas ordenó un estudio de factibilidad técnico-económico a la firma Electroconsult de Milán, Italia, para el aprovechamiento de la energía de este campo geotermal, cuyas principales conclusiones fueron:

- Era totalmente factible, tanto económica como técnicamente, instalar una central geotermoeléctrica de unos 15 MW de potencia, para aprovechar de inmediato el vapor que se estaba produciendo. La central podría entrar en operación en 1984.
- El costo total de la planta con todos sus equipos y la línea de transmisión hasta la ciudad de Calama, sería de alrededor de US\$ 12 millones; ésto es, unos US\$ 600 por KW instalado (valores del año 1975)*.
- La producción neta de energía eléctrica puesta en Calama alcanzaría 120×10^6 Kwh al año.
- El costo de la energía eléctrica de El Tatio, sería la cuarta parte del costo que poseía la planta termoeléctrica de la ciudad de Tocopilla, la cual abastece las necesidades del mineral de Chuquibambilla,

y que incluye generadores obsoletos y gran consumo de combustibles.

Conjuntamente con la decisión de construir esta planta, se planteó la necesidad de implementar un nuevo programa de perforación de pozos para instalar en futuras etapas otras centrales geotermoeléctricas, con el objeto de ir aprovechando gradualmente la capacidad energética de este campo.

Finalmente en 1978, a raíz de este estudio de factibilidad, como se mencionó anteriormente, se realizó un llamado internacional para la futura construcción de una planta geotermoeléctrica, para el cual, si bien hubo varios interesados, no se adoptó una decisión por problemas de enfoque de política económica.

En la actualidad, la CORFO prepara licitar el proyecto El Tatio.

Campo Geotérmico de Puchuldiza

Este campo está situado en la I Región del norte de Chile, a 150 km. al noreste de Iquique y a 4250 m.s.n.m.

Está ligado a una depresión volcánico-tectónica rodeada por volcanes andesíticos del Plio-Cuaternario.

La mayoría de las fuentes emergen en niveles relativamente bajos a lo largo del río Puchuldiza y sus pequeños tributarios; están representadas por vertientes, pozas de agua caliente, algunos géiseres y fumarolas. La temperatura de las fuentes comúnmente excede 86°C.

Las manifestaciones termales parecen ubicarse en la intersección de dos sistemas de fallas, uno de rumbo aproximado N.N.E., de edad posiblemente pliocénica, y otro menos evidente, de rumbo N.N.W. y probablemente de edad pleistocénica. Rocas alteradas hidrotermalmente de color blanco se extienden a lo largo de las trazas de esas fallas.

Las exploraciones en este campo termal se iniciaron a fines de 1969 y fueron suspendidas a mediados de 1972 por problemas financieros. En este período se realizaron estudios geológicos (geología regional, 200 km². de geología de detalle, geología de pozos), geoquímicos (en pozos y fuentes termales), geofísicos (resistividad, gravimetría, magnetometría) y termometría por parte de Naciones Unidas.

Sus aguas calientes son cercanamente neutras con contenidos importantes de Na, Cl, Li, Cs y Rb; los principales gases disueltos son CO₂ y H₂S. Prospecciones geoeléctricas detectaron una anomalía de 28 km². con una resistividad aparente inferior a 10 ohm/m.

Posteriormente se realizaron nuevos trabajos bajo el apoyo económico de la Autoridad de la I Región del país, los cuales se iniciaron en Octubre de 1974 y terminaron en 1977. En este lapso se perforaron 5 pozos de exploración, pero con diámetros de producción, que alcanzaron profundidades de 450 a 1.000 metros. La temperatura obtenida fue de 170°C, la cual no se considera económicamente explotable, pero las investigaciones se reanudaron al comprobarse con nuevos datos de resistividad que éstos estudios correspondían a una zona marginal del campo.

De tal forma se perforó un 6to. pozo, en 1980, por recomendación de expertos de la Japan International Cooperation Agency (J.I.C.A.), de 1.150 metros de profundidad, que alcanzó 200°C. Inicialmente el pozo fluyó, pero después se detuvo por problemas de escasa permeabilidad del reservorio. El proyecto se suspendió en 1982.

Campo Geotermal de Surire

Esta área termal está situada en el extremo sureste del salar de Surire, en la I Región de Chile, cercana al límite con Bolivia.

El salar cubre un área de 570 km². y constituye una depresión rellena con sedimentos fluviales y lacustres, así como depósitos glaciares y morrénicos. Contiene importantes depósitos de bórax.

El campo termal cubre un área de unos 45 km². y se localiza en el extremo sureste del salar. Está representado por cerca de 230 fuentes calientes, principalmente pozas y vertientes calientes. La temperatura del agua en superficie tiene un rango de 20°- 80°C y la temperatura mínima de fondo estimada es de 250°C.

Casi todas las fuentes calientes, especialmente aquellas de más altas temperaturas, están localizadas a lo largo de fracturas de orientación noreste; otras están a lo largo de fracturas de orientación norte y noroeste. Su pérdida natural de calor se determinó en 28×10^6 cal/seg.

En esta área se han realizado estudios preliminares de geología, hidrogeología y termometría.

4. PROBLEMAS ENCONTRADOS

En lo que compete a la actividad geotérmica en Chile, la autoridad de Gobierno ha estimado pertinente incentivar una política tendiente a otorgar particular participación en estas labores a instituciones privadas; desgraciadamente los inversionistas privados no cuentan con el necesario respaldo financiero para invertir en programas de desarrollo, como una forma de garantizar inversiones tendientes a explotar el recurso.

Frente a esta eventualidad, una de las alternativas más atractivas estaría dada por la reiniciación de nuevas campañas de exploración geotérmica con el respaldo y auspicio de entidades internacionales (Naciones Unidas, Organización Latinoamericana de Energía, etc.), como una forma de reconocer la real potencialidad de áreas geotérmicas atractivas.

Adicionalmente merecen destacarse los siguientes factores (problemas y necesidades) que limitan el desarrollo de la actividad geotermal en Chile:

a) Altos costos de perforación

Los altos costos de perforación de pozos exploratorios y/o de producción en los campos geotérmicos, limita el interés del sector privado por efectuar inversiones que impliquen tales gastos.

b) Ubicación de los campos geotérmicos

La mayoría de los campos geotérmicos en Chile (regiones de Tarapacá y Antofagasta) están situados en la Cordillera Andina, lo cual implica: alturas cercanas a 4.000 m.s.n.m., condiciones climáticas adversas, grandes distancias a centros poblados de importancia, caminos deficientes, etc., motivos que han constituido problemas para un desarrollo más sostenido de los trabajos geotérmicos.

c) Discontinuidad de la investigación

Los estudios en este campo han sufrido fuertes fluctuaciones en su historia, principalmente por problemas económicos, lo que ha impedido que se encuentren en un mejor nivel de desarrollo. Actualmente el gobierno no considera de primera prioridad invertir en este tipo de estudios energéticos, por lo que una de las formas de superar este problema sería contar con la colaboración de organismos internacionales que gestionen líneas de crédito, con el propósito de contar con financiamiento adecuado a lo largo de todas las etapas de los proyectos geotérmicos (reconocimiento, factibilidad, desarrollo, explotación) evitando discontinuidades en sus desarrollos.

5. PRINCIPALES NECESIDADES

a) Necesidad de contar con personal capacitado

En Chile es muy necesario contar con un grupo de técnicos capacitados en todos los aspectos de la geotermia, tales como expertos a ni

vel de post-grado en universidades extranjeras, para lo cual se requiere que en el país existan proyectos concretos de geotermia, adecuadamente dirigidos por algún organismo competente, con todas las fases de una metodología de trabajo y un buen funcionamiento, de modo de incentivar este tipo de especializaciones.

b) Necesidad de contar con centros especializados de análisis de datos geotérmicos

Ante la carencia en Chile de expertos en geotermia, sería muy positiva la creación de un centro u organismo que realizará análisis e interpretaciones de datos geotérmicos, como una forma de asesorar en sus propios proyectos a los profesionales que laboran en este campo. Este organismo podría operar a nivel internacional, con aportes financieros de los distintos países interesados en desarrollar sus fuentes geotermiales.

6. RECURSOS HUMANOS DISPONIBLES

En Chile existe un limitado número de profesionales vinculados al campo de la geotermia. Solamente alrededor de 20 geólogos y 10 ingenieros de distintas especialidades han trabajado o tenido algún grado de participación, en proyectos o estudios específicos en torno a la geotermia. Sus trabajos se encuentran principalmente en el Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica-CORFO y en el Servicio Nacional de Geología y Minería.

También varios expertos geotérmicos en las diferentes disciplinas geocientíficas han venido a Chile, a través del programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo, (1969 - 1976), principalmente procedentes de: Nueva Zelandia, Irlanda, Inglaterra, Japón e Italia.

Se estima que alrededor de 120 personas, aparte de los profesionales, trabajaron en los campos geotérmicos de El Tatio y Puchuldiza, entre los años 1970 - 1974.

En la actualidad, si se deseara reactivar los estudios geotérmicos en El Tatio, Puchuldiza y otras dos áreas de interés, se requeriría de un staff profesional de expertos que no existen en Chile. Otros profesionales como ingenieros, geólogos, químicos, etc. para completar este equipo se encuentran en el país y de muy buen nivel técnico.

7. PROGRAMAS PREVISTOS EN EL CORTO PLAZO

Desde la disolución del Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica a principios de 1982, no existe en Chile una política de exploración ni explotación de los recursos geotérmicos.

El Estado es de opinión que estos recursos deben ser entregados a empresas u organismos del sector privado interesados en su estudio y eventual explotación, para lo cual, la CORFO está avocada a la confección de las bases de la licitación del campo geotérmico de El Tatio, él que a juzgar por los estudios de factibilidad, ofrecería las mejores expectativas económicas de explotación.

Esta licitación se espera efectuarla en Septiembre del año en curso, para adjudicarla en Marzo de 1984.

Si la licitación tiene éxito, la construcción de una planta geotérmoe-léctrica podría iniciarse a fines de 1984, para entrar en operaciones a principios de 1987; en caso contrario, no están definidas las perspectivas futuras de este tipo de energía.

8. INCIDENCIA DE LA GEOTERMIA EN EL SECTOR ENERGIA

En Chile, el consumo de energía por habitante es del orden de los 7 X 10⁶ calorías por año, situándose en el 3er. lugar en Latinoamérica, sólo superado por Venezuela y Argentina (Datos de 1980)

Un 43,6% del total de la energía comercial es consumida por la industria y la minería, un 25,8% por el transporte y un 24,6% se distribuye entre alumbrado público y consumos comerciales y habitacionales. La producción de cobre requiere que el país le destine el 20% del total de la energía consumida.

La importancia relativa que la geotermia posee dentro del sector energía chileno constituye un porcentaje muy bajo, tanto en la actualidad, como proyectada a futuro, según se desprende de la tabla que a continuación se presenta, publicada el año 1980 por el Instituto de Ingenieros de Minas de Chile en su edición de 'La minería en Chile:

FUENTE DE ENERGIA	ANOS (Cifras porcentuales)			
	1977	1980	1985	1990
Hidroeléctrica	24,2	21,4	25,6	25,6
Carbón (incluye carbón importado)	13,6	13,6	12,2	11,4
Hidrocarburos (incluye gas natural)	61,8	64,8	60,7	55,0
Energía geotermal y solar	0,4	1,0	1,5	2,0
	100%	100%	100%	94%

Desde el punto de vista regional, si la parte norte de Chile alcanzara un buen desarrollo de su potencial geotérmico, considerando su déficit de fuentes energéticas, se estima que este recurso incidiría del orden de un 5% en el ámbito energético de esa región.

En la medida que el país incremente sus conocimientos de los campos geotérmicos, puede ir elaborando planes de desarrollo de este recurso en las diferentes regiones, de acuerdo a las necesidades propias de cada una de ellas, y por consiguiente, aumentar la aplicación de la energía geotérmica respecto a otros tipos de energía convencionales.

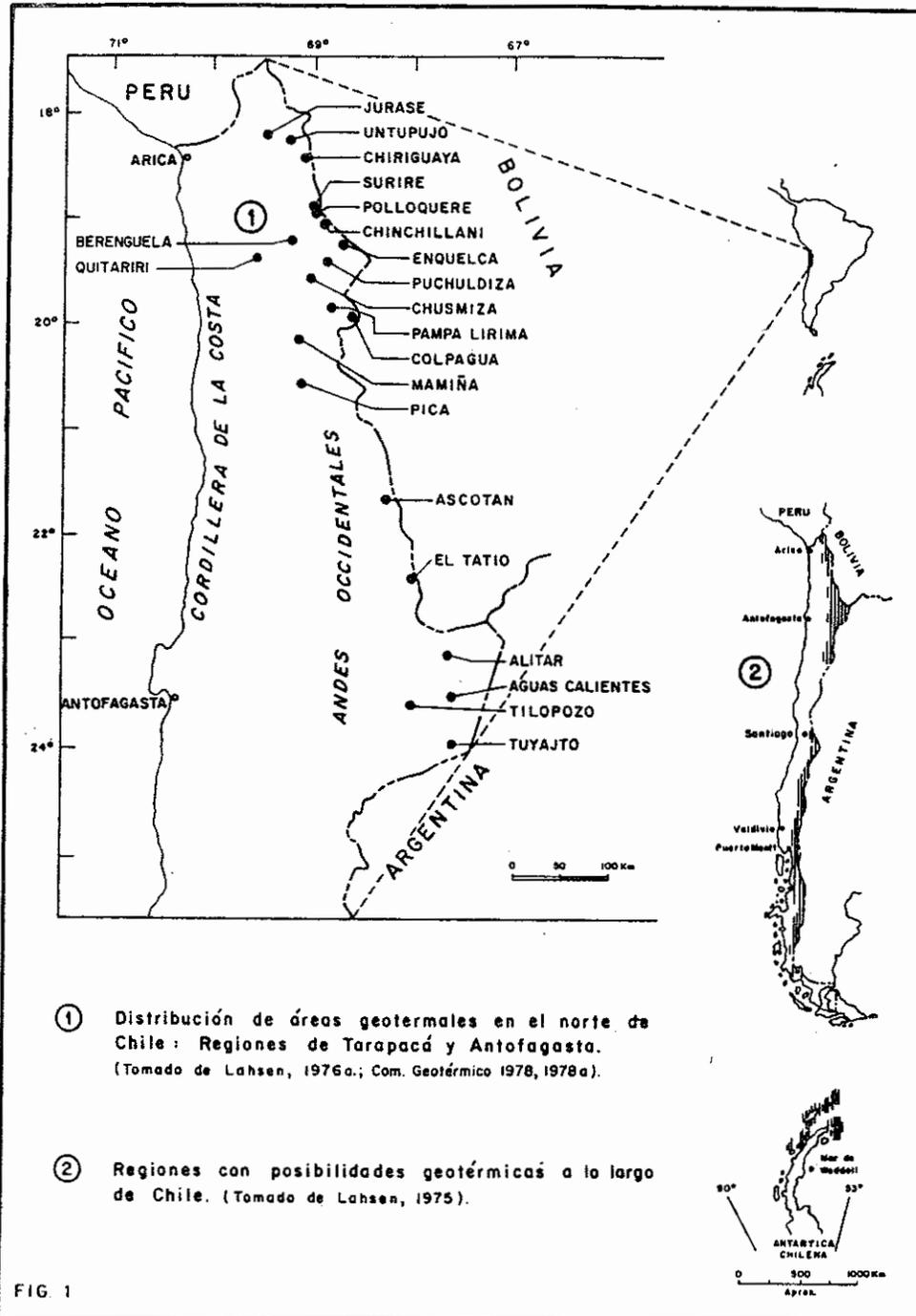
Así, en el norte de Chile se ha estudiado en algunos casos, la posibilidad de emplear esta energía, además de la generación eléctrica, en producir agua dulce por desalinización de los vapores termales, en la recuperación de sales y minerales de valor económico a partir de las salmueras y en la refinación de azufre mediante vapor geotérmico para producir H_2SO_4 , el cual tiene gran aplicación en la actividad extractiva del cobre, etc.

En el resto del país, y generalmente en las cercanías de los volcanes, se dispone de antecedentes de un gran número de áreas termales, incluyendo la Antártica chilena. En tal sentido, la región cordillerana central-sur del país, ofrece buenas posibilidades de recursos geotérmicos, si se considera que sus condiciones climáticas aseguran una adecuada recarga de agua a los sistemas geotérmicos, y que, existe en esa parte del país una mayor densidad de población. Estos recursos podrían ser empleados, además de la generación de energía eléctrica, en calefacción, agroindustrias, industria papelera, etc.

De acuerdo al grado de conocimiento que se dispone de los recursos geotérmicos del país, se ha llegado a estimar que si las investigaciones tienen éxito, existirían campos geotérmicos con una capacidad potencial en el rango de 500 a 1.000 MW.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- COMITE GEOTERMICO-CORFO, 1970.- Recursos geotérmicos (Inédito), Santiago
- COMITE GEOTERMICO-CORFO, 1978.- Catastro Geotérmico I Región, (Inédito) Santiago
- COMITE GEOTERMICO-CORFO, 1978.- Catastro Geotérmico II Región, (Inédito) Santiago
- COMITE GEOTERMICO-CORFO, s/fecha.- La Energía Geotérmica en Chile. Inf. No. 8 (Inédito) Santiago
- INSTITUTO DE INGENIEROS DE MINAS DE CHILE, 1980.- La Minería en Chile. Págs. 73-75; 55 Santiago
- LAHSEN, A., 1969.- Geología de la zona comprendida entre El Tatio y los Cerros de Ayquina. Com. Geot. CORFO. (Inédito) Santiago
- LAHSEN, A., 1970.- Estudio para el desarrollo geotérmico en el norte de Chile. Informe Preliminar sobre la geología de Puchuldiza. Com. Geot. CORFO (Inédito) Santiago
- LAHSEN, A., 1975.- La Energía Geotérmica y sus posibilidades de desarrollo en Chile. Revista Minerale. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile. Vol. XXX, No. 132, Pág. 11-21.
- LAHSEN, A., Y TRUJILLO, P., 1975.- El Campo Geotérmico de El Tatio II U.N. Symp. Dev. and Util. Geoth. Res. California
- LAHSEN, A., 1976.- Geothermal Exploration in Northern Chile. The American Association of Petroleum Geologists. Circum-pacific Energy and Mineral Resources. Memoir No. 25
- LAHSEN, A., 1976.- La actividad geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el N. de Chile. Santiago. Actas I Congreso Geológico Chileno. Tomo I, Pág. B-105 - 127.



2.6. "RESUMEN SOBRE EL ESTADO DE LA EXPLORACION GEOTERMICA EN ECUADOR"

Proyecto Geotérmico del Instituto Ecuatoriano de Electrificación
(INECEL)
Quito, Ecuador

1. CRONOLOGIA DE LAS ACTIVIDADES

Hacia fines de 1978, INECEL decidió iniciar los primeros estudios referentes a la búsqueda de recursos geotérmicos aptos para la generación eléctrica. Se inició formando un grupo de trabajo, compuesto mayormente por geólogos, el cual comenzó por recopilar la información básica.

Mediante un Convenio de Cooperación no reembolsable, suscrito con la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), se desarrolló en el período comprendido entre los meses de Julio a Septiembre del año 1979, los trabajos de exploración geotérmica correspondientes a la Etapa de Reconocimiento a nivel nacional. Estas investigaciones fueron efectuadas por personal técnico de OLADE e INECEL.

El informe final de este estudio fue concluido a mediados de 1980. A este se le han anexado los resultados de las investigaciones proseguidas ininterrumpidamente por INECEL.

Como consecuencia del mismo se definieron en orden de prioridades las áreas seleccionadas (Fig. No.1), desde el punto de vista geotérmico de alta entalpía. La selección de prioridades se hizo en base a los siguientes parámetros:

- a) Ubicación de la zona dentro de una región afectada por fenómenos volcánicos recientes que lo convierten, potencialmente, en sede de

una anomalía regional de flujo de calor.

- b) Intensidad, frecuencia, volumen y edad del vulcanismo genéticamente ligado a cada una de las áreas; presencia, o no, de productos magnéticos evolucionados originados por fraccionamiento superficial.
- c) Condiciones hidrogeológicas generales; particularmente en cuanto a la presencia de zonas de recarga con posibilidades de alimentar a acuíferos del substrato profundo.
- d) Tipo y características químicas de las manifestaciones termales, resultados preliminares de la geotermometría y valorización de la relación salinidad-termalidad.

Las áreas seleccionadas y sus respectivas prioridades son las siguientes:

Primera prioridad: Tufiño, Imbabura - Cayambe y Chalupas
Segunda prioridad: Ilaló, Chimborazo y Cuenca

Durante 1981, con la asesoría de OLADE, INECEL llevó a cabo las investigaciones correspondientes a la primera fase del estudio de Prefactibilidad en el área de Tufiño. En el año de 1982 INECEL inició con sus propios recursos los estudios de la primera fase de la Prefactibilidad de Chalupas. Al momento están por iniciarse los trabajos de la segunda fase, esto es, las investigaciones geofísicas y la geoquímica de detalle. Además en ese mismo año se realizaron estudios complementarios al Reconocimiento en el área de Imbabura-Cayambe, contando con la asesoría técnica de OLADE, estableciéndose que la zona de mayor interés dentro de esa gran área, era la región de Chachimbiro-Cotacachi-Cuicocha.

Paralelamente a estas actividades se ha desarrollado un programa de capacitación de personal nacional en las diversas disciplinas de la explotación geotérmica, orientado a alcanzar la máxima autarquía tecnológica.

2. RESULTADOS OBTENIDOS

2.1 Area de Tufiño-Chiles

El área de Tufiño-Chiles en sentido estricto se sitúa en la frontera colombo-ecuatoriana, en el dominio de la Cordillera Occidental de los Andes, y está centrada en torno a los aparatos volcánicos recientes Chiles y Cerro Negro. La línea fronteriza pasa por las cumbres de ambos volcanes y divide longitudinalmente en dos mitades el sector de interés geotérmico (Fig. No. 2).

La superficie a estudiarse constituye una faja de 40 km. de ancho (20 km. a cada lado de la frontera), comprendida entre la cumbre de la cordillera occidental y las ciudades de Tulcán e Ipiales, abarcando un área de 1.800 km².

El interés geotérmico del área fronteriza Tufiño-Chiles es conocido en función de los estudios de reconocimiento a nivel nacional, desarrollados por los gobiernos de Colombia y Ecuador, en sus respectivos territorios, con el apoyo técnico y financiero de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). En efecto, los resultados hasta la fecha colectados indican la gran importancia e interés que presenta el área en mención, para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos en ambos países; de lo que se deriva la necesidad de continuar los estudios exploratorios en la etapa de prefactibilidad, según la metodología de OLADE, la que es aplicable en las condiciones geológicas del área considerada.

En vista de lo anterior, los gobiernos de Colombia y Ecuador representados por los señores Ministros de Minas y Energía y de Recursos Naturales y Energéticos, respectivamente, suscribieron en Bogotá el 26 de Marzo de 1982 un "Acuerdo Complementario del Convenio de Cooperación Técnica y Científica para la Exploración Geotérmica del área fronteriza región Chiles-Cerro Negro-Tufiño", según el cual, con el apoyo técnico de OLADE, se tendrían que continuar de-

sarrollando los estudios de exploración geotérmica, bajo la responsabilidad conjunta del Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL) y del Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL).

2.1.1 Características

El Chiles y el Cerro Negro son dos aparatos volcánicos contiguos, alimentados desde una cámara magmática única, que se ubican sobre una fractura de dirección WNW-ESE. (Fig. No. 3).

La presencia en esta zona, de una elevada anomalía térmica está indicada por los siguientes elementos:

- a) La persistencia de actividad volcánica desde el Pleistoceno medio a la actualidad;
- b) La presencia de una cámara magmática superficial situada, probablemente, a una profundidad de 2-3 km., alimentada de modo casi continuo al menos en los últimos 35.000 años. El volumen mínimo de esta cámara se ha estimado igual a unos 5.5 km³. La reconstrucción de la anomalía térmica inducida en las rocas encajantes, sugiere temperaturas suficientes para la formación de un sistema geotérmico de alta entalpía a profundidades del orden de 1 km.
- c) La existencia de una extensa zona de alteración hidrotermal y de un pequeño cráter de explosión freática perfectamente conservado.
- d) La presencia de claras anomalías de temperatura en las aguas termales de la zona, que pertenecen a los circuitos superficiales de circulación, confirman un elevado flujo de calor terrestre.

2.2 Area de Chalupas

La zona en mención se encuentra aproximadamente a 70 km. al SE de

Quito (Fig. No. 4); su interés se centra en la presencia de una caldera de aproximadamente 18 km. de largo por 15 km. de ancho, la cual se formó debido al colapso del Volcán Chalupas, luego de que éste emitió importantes flujos piroclásticos ácidos que rellenaron la depresión interandina, hacia el N hasta el Valle de los Chillos y hacia el S hasta la ciudad de Ambato, con un volumen mínimo estimado de 100 km³. Una reactivación postcaldera con diferentes episodios, hace que la misma se convierta en una potencial sede de una anomalía de calor. Rocas volcánicas pliocénicas forman el substrato y dentro del área del colapso tendrían la permeabilidad necesaria para dar cabida a un reservorio geotérmico. Materiales fluviolacustres, flujos piroclásticos, flujos lávicos, y sedimentos morrénicos, constituyen el relleno final de la caldera, garantizando los mismos una buena capa de sello al sistema (Fig. No. 5). Finalmente la recarga está asegurada por tratarse de una zona de alta pluviosidad.

2.2.1 Características

Fuente de calor: se hipotetiza la presencia de una cámara magnética de gran tamaño emplazada en la parte superior de la corteza terrestre (5-8 km. de profundidad desde la superficie). El vaciado parcial del tope de la misma produjo la erupción y consecuente depósito de flujos de ceniza riolítica (ash-flows) del orden de los 100 km³., en el Pleistoceno superior. Una gran caldera de 15-18 km. de diámetro y 0.5 km. de profundidad se formó por colapso a causa del vaciado violento. Actividad posterior ha arrojado materiales más o menos diferenciados que van desde dacitas hasta andesitas piroxénicas y olivínicas.

Reservorio: tiene una potencia de 500-1.000 m. (mínimo) y está constituido por rocas volcánicas precolapso, mayormente flujos de lava, brechas, aglomerados y tobas antiguas (Terciario Superior a Pleistoceno Inferior-Medio).

Hay escasas manifestaciones de fuga en superficie debido a la ca

pa sello y al alto grado de dilución que sufren los escapes laterales del sistema. Fuentes termales de 36°C indican aguas cloruradas-bicarbonatadas altamente diluidas. Aparentemente no hay aporte magnético al sistema.

Capa sello: tiene una potencia de 200 a 500 m. (mínimo). Está constituida por varias capas de depósitos piroclásticos de flujos de ceniza (ash-flow), intercalaciones de flujos de lava, morrenas, sedimentos lacustres y lahares. En la parte central se encuentran material volcánico muy alterado por acción hidrotermal.

Recarga: la zona se caracteriza por una pluviosidad relativamente alta. Aguas meteóricas penetrarían por la parte central (chimenea volcánica) y por fallas y fracturas periféricas del colapso.

2.3 Area de Imbabura

El área se encuentra situada en la Provincia de Imbabura y comprende los volcanes Cuicocha, Cotacachi, Negro Puno y el complejo domo Chachimbiro (Fig. No. 6). Las características que ponen de manifiesto la potencialidad geotérmica del sector son las siguientes:

1. Tectónica distensiva actual en correspondencia con el borde occidental del graben interandino: se manifiesta por un tren de fallas longitudinales, cortado por numerosas transversales.
2. Basamento constituido por lavas submarinas cretácicas: son frágiles y poseen permeabilidad secundaria debido a la tectónica mencionada. La existencia de acuíferos en el subsuelo está probada por el carácter freatomagnético y los productos volcánicos hidrotermalizados emitidos por éste.
3. Fuerte anomalía térmica superficial inducida por el estacionamiento de magma en niveles superficiales, lo cual está evidenciado por una extraordinaria concentración de aparatos volcánicos

cos muy diferenciados, de edad subactual o muy reciente.

4. Presencia de fuentes termales con alto contenido en sales y gases disueltos.

2.4 Otras áreas de interés

El levantamiento geológico regional realizado en la etapa de Prefactibilidad del Proyecto Tufiño, puso de manifiesto la existencia de dos áreas que presentan características geovulcanológicas apropiadas para la existencia de nuevos campos geotérmicos, estas son el volcán Iguán y la caldera de Chalpatán situadas en la Provincia del Carchi (Fig. No. 7).

2.4.1 Caldera de Chalpatán

El interés geotérmico de esta zona se deriva, sobre todo, del hecho de que aquí se concentran las más evidentes anomalías geoquímicas de boro y amoníaco, junto también a anomalías de temperatura. A pesar del carácter preliminar de estos resultados, debido a escaso número de puntos analizados, las referidas anomalías indican la probable existencia de fugas de vapor de un reservorio geotérmico situado a profundidad desconocida.

La caldera de Chalpatán no ha sido objeto de un estudio geovulcanológico de detalle; en particular faltan datos sobre la edad y la naturaleza de los productos, aunque las informaciones preliminares son muy interesantes. En efecto la presencia de una extensa caldera, de unos 7 km. de diámetro, indica la probable existencia de una gran cámara magmática próxima a la superficie, de la cual han emergido ingentes volúmenes de productos volcánicos precaldéricos. Las fases eruptivas finales de la cámara están representadas por la implantación de varios aparatos en los bordes de la caldera.

2.4.2. Volcán Iguán

El estudio geológico de este volcán ha puesto en evidencia su interés geotérmico, debido a que presenta una evolución magmática bastante completa, la cual comprende por lo menos, dos grandes episodios de alta explosividad con magmas evolucionados (erupción de pómez) y la construcción de un estrato volcán lávico. Esto conduce a pensar que está alimentado por una cámara magmática superficial cuya dimensión y profundidad son hasta ahora desconocidas.

Entre los productos explosivos existen abundantes facies freatomagmáticas resultantes de la interacción de los magmas con el agua. Estas contienen numerosos líticos, predominantemente de lavas pliocénicas, parte de las cuales están intencionalmente hidrotermalizados, en tanto que no se encuentran fragmentos del basamento.

Estos datos sugieren la presencia de un sistema geotérmico de alta temperatura en las proximidades de la cámara magmática del volcán.

3. PROBLEMAS ENCONTRADOS

- a) La escasez casi absoluta de datos geocientíficos básicos en el ámbito de los terrenos volcánicos, obligó a INECEL a efectuar con sus propios medios, el levantamiento geológico-vulcanológico del área andina y a iniciar un inventario de manifestaciones termales de superficie.
- b) Ausencia en el país de laboratorios para análisis químicos de aguas, afines con los objetivos perseguidos en la exploración.
- c) Elevado costo de los análisis químicos de aguas, rocas y gases en

el extranjero, lo que condiciona en gran parte los programas de investigación.

- d) Dificultad en la consecución de financiamiento para mantener la continuidad de los estudios.

4. PRINCIPALES NECESIDADES

- a) Incremento de personal nacional para las investigaciones del Proyecto.
- b) Intercambio continuo de experiencias con los profesionales de otros países de la región, involucrados en las actividades geotérmicas.
- c) Obtención periódica de información geocientífica básica.
- d) Capacitación permanente del personal.

5. RECURSOS HUMANOS

INECEL se ha preocupado de apoyar la capacitación del personal, mediante el envío de sus técnicos a cursos internacionales y últimamente, co-
auspiciando el Primer Curso Latinoamericano de Vulcanología organizado por OLADE.

El grupo técnico-científico de INECEL especializado en geotermia está integrado por:

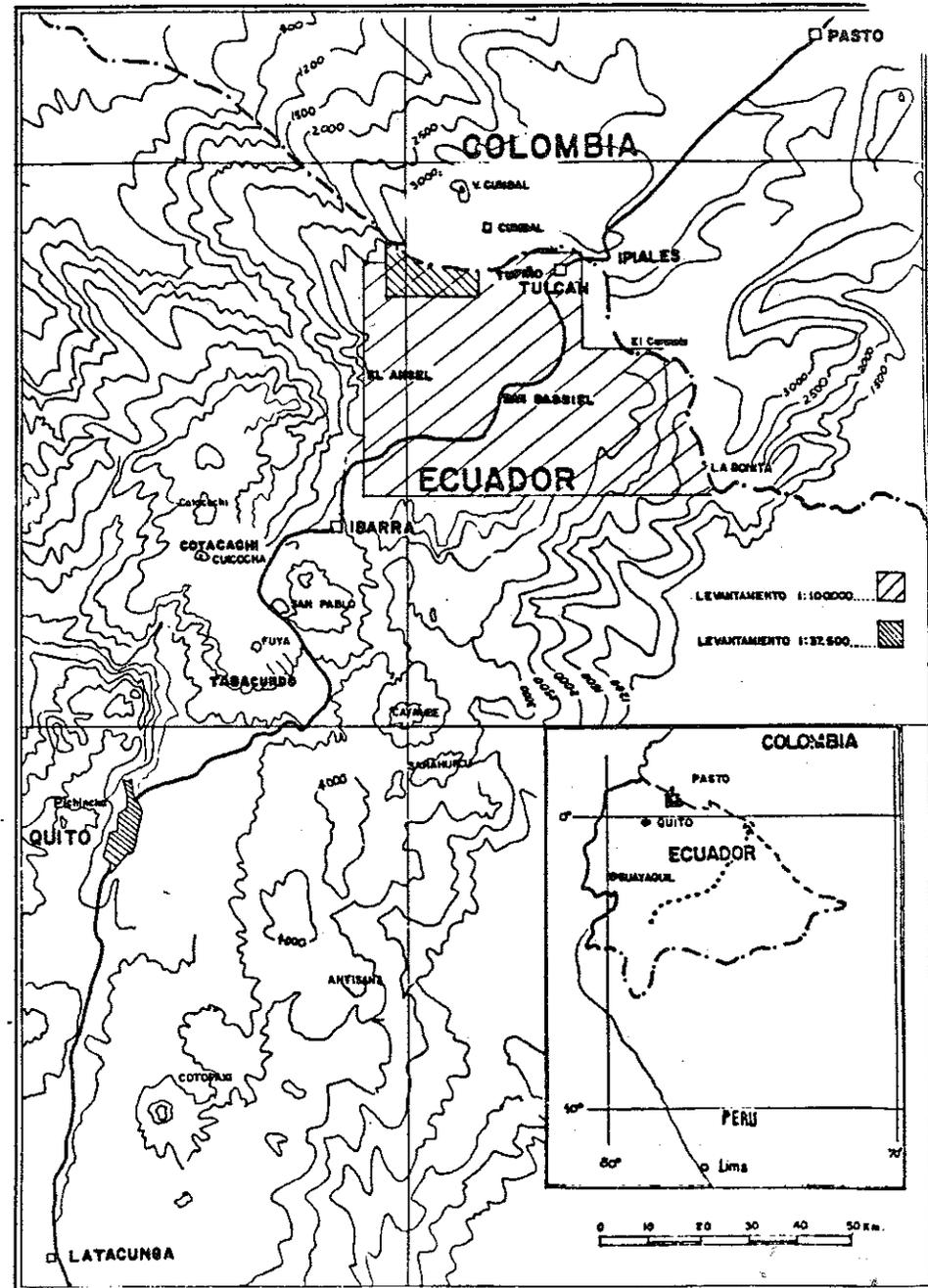
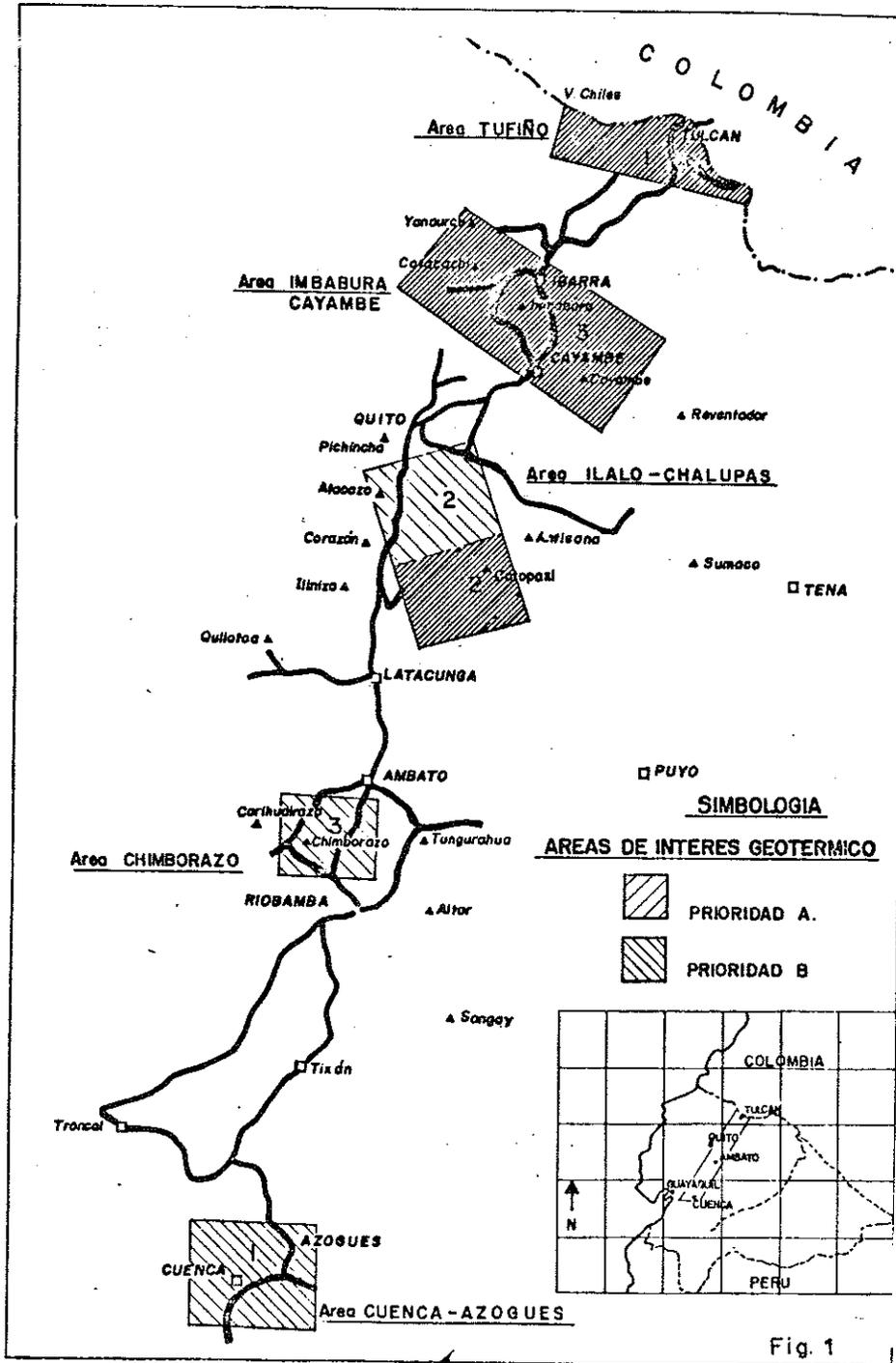
- un ingeniero geólogo, Jefe del Proyecto
- tres ingenieros geólogos

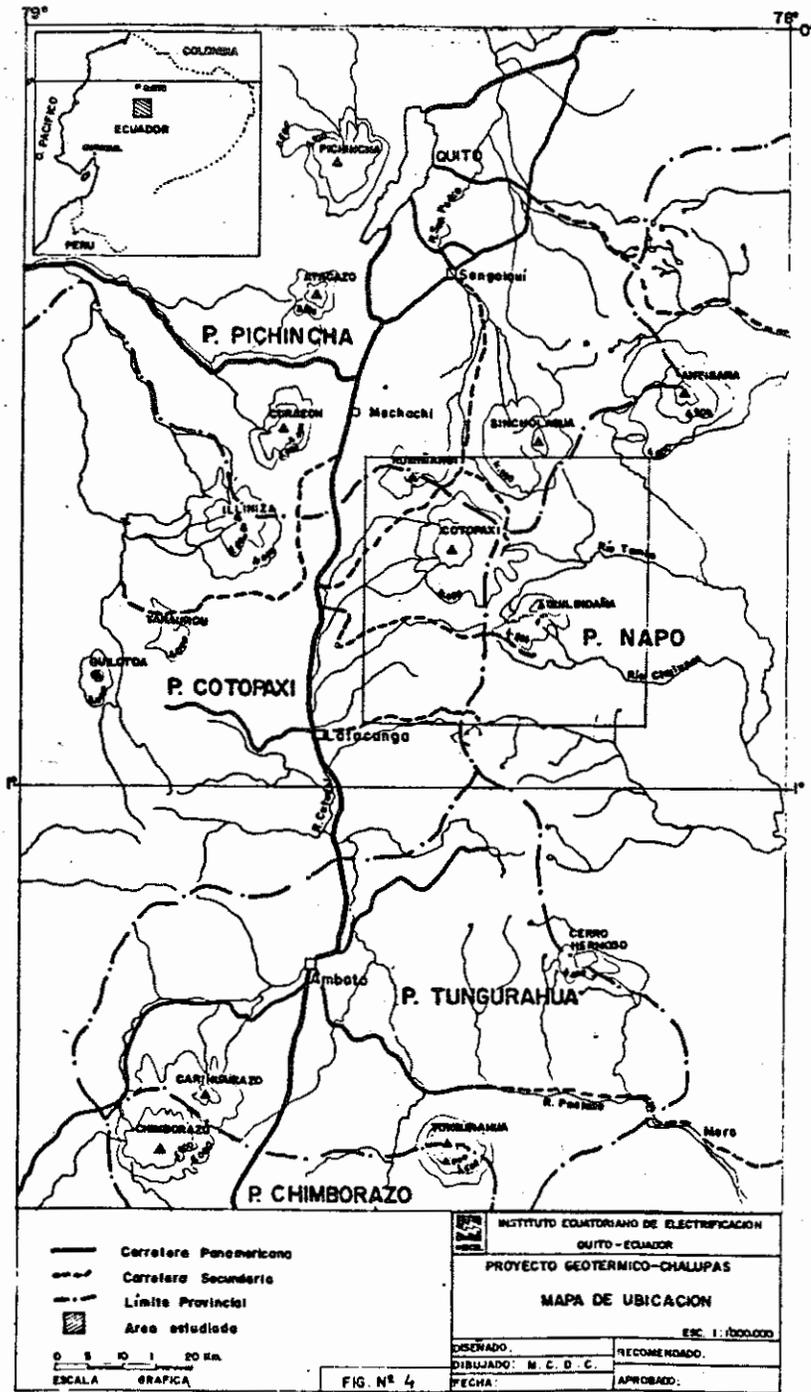
La capacitación del personal técnico se ha efectuado en Italia, Nueva Zelandia, México, Colombia y Ecuador.

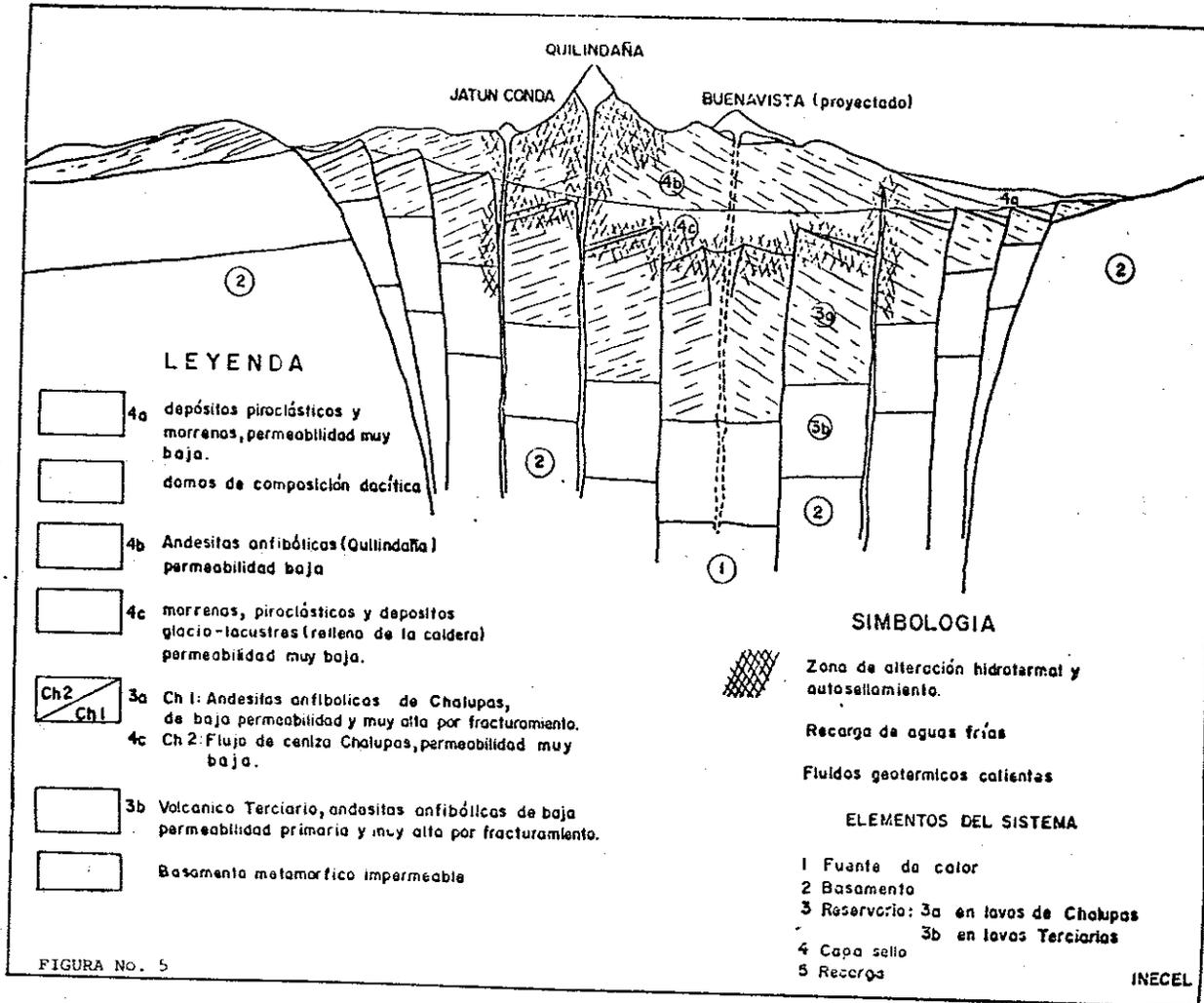
6. PROGRAMAS PREVISTOS

INECEL con sus propios recursos continuará los estudios de la segunda fase de Prefactibilidad en Chalupas, el instituto cuenta con los equipos para la ejecución de las campañas de Gravimetría, Geoeléctrica y Perforaciones someras. Además se continuarán, luego de concretarse el financiamiento y dentro del marco establecido por el acuerdo suscrito entre los gobiernos de Colombia y Ecuador, con los estudios de la segunda fase de Prefactibilidad en el Proyecto Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro.

Paralelamente INECEL continuará con estudios geovulcanológicos en la Cordillera de los Andes, cuya finalidad es, mantener actualizada la información geocientífica.







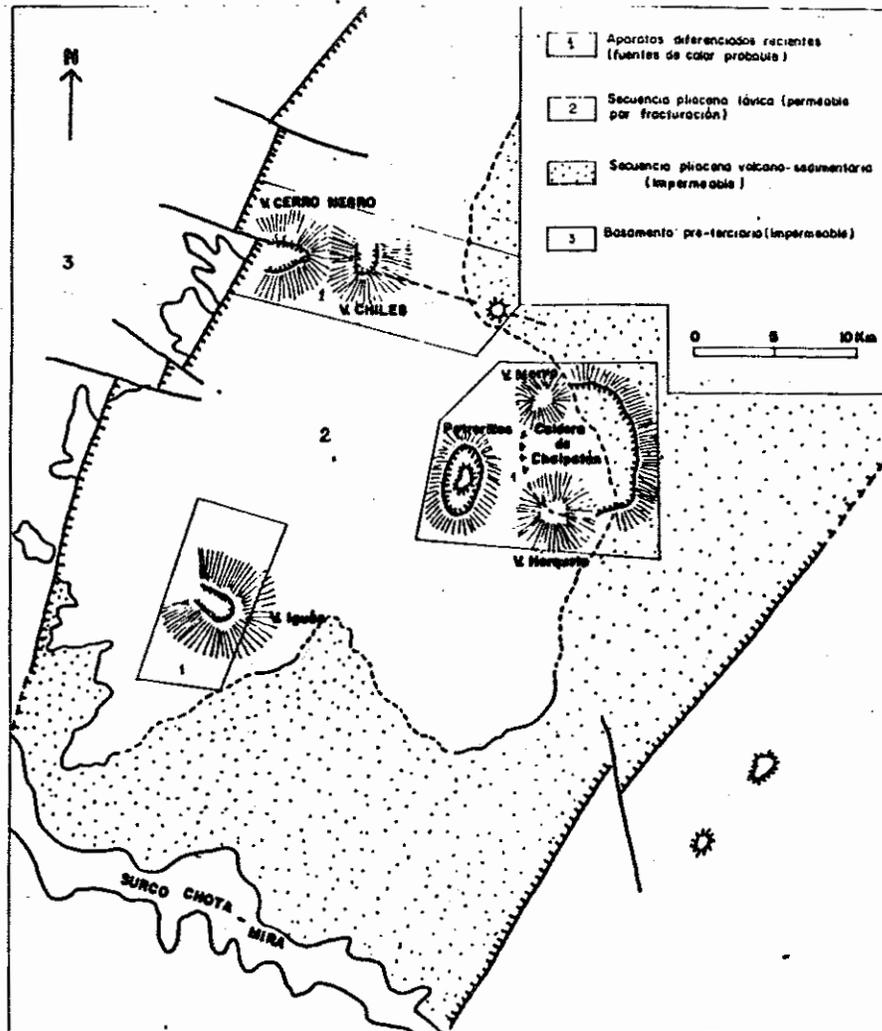


Fig. 7.- Areas de interés geotérmico potencial en función de la coexistencia de aparatos diferenciados recientes y secuencia lavica pliocena (permeable por fracturación)

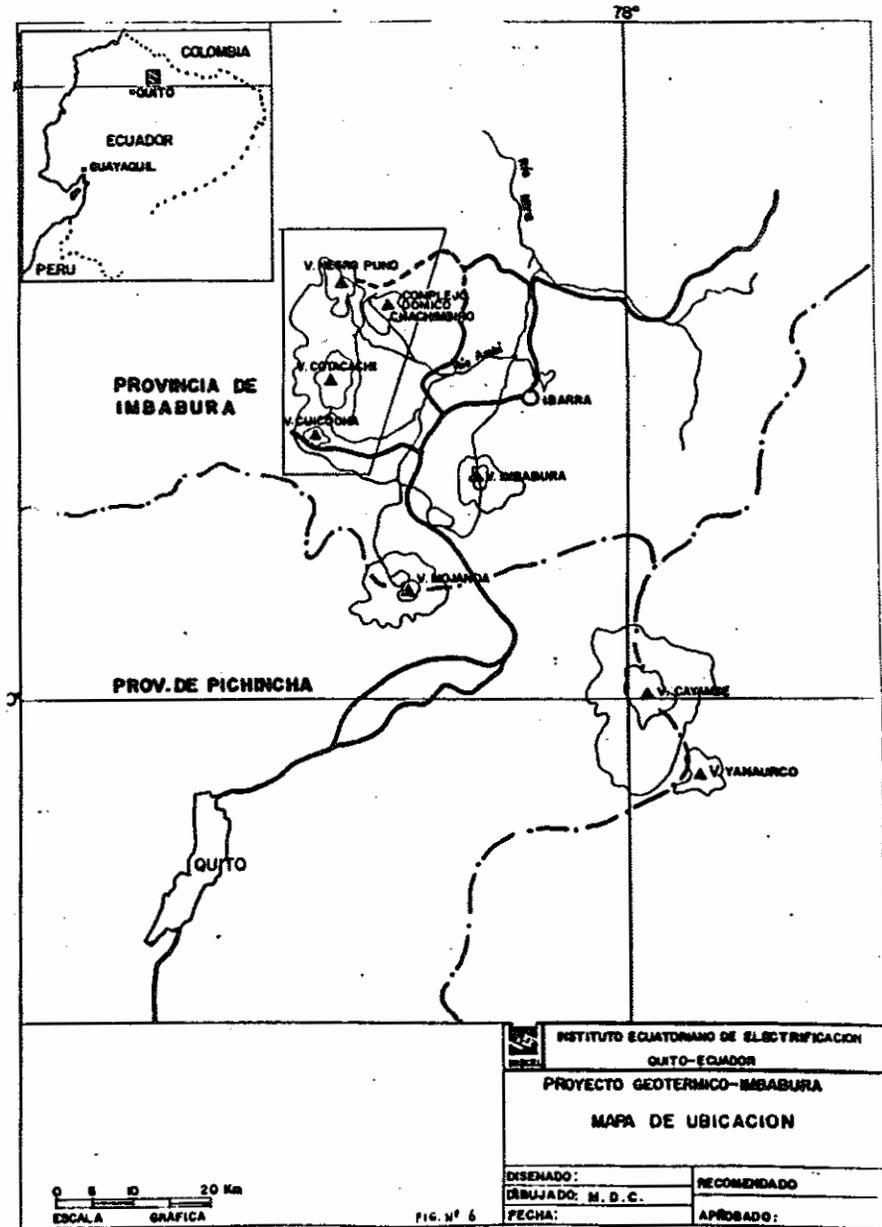


FIG. Nº 6

2.7 "DESARROLLO DE LA GEOTERMIA" EN EL SALVADOR

Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa, CEL
San Salvador, El Salvador

1. SINTESIS CRONOLOGICA DE ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Los estudios geotérmicos realizados en El Salvador fueron iniciados en el área Ahuachapán durante el año 1953, por el Servicio Geológico Nacional y la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL). Como complemento de las investigaciones geocientíficas se perforaron varios pozos de pequeño diámetro, llegando a la conclusión de que en esta área existían buenas perspectivas para el aprovechamiento de la energía endógena, habiéndose previsto la necesidad de realizar investigaciones con mayor detalle.

Posteriormente la CEL, con la asistencia técnica-económica del Fondo Especial de las Naciones Unidas (PNUD), procedió a desarrollar un proyecto de investigación geotérmica a nivel nacional, concluyendo en la determinación de unas 5 áreas de posibles explotación para generación eléctrica, indicando además su orden prioritario: Ahuachapán, Berlín, San Vicente, Chinameca y Chipilapa.

Otros campos como Santa Rosa de Lima, Carolina del Norte, Dulce Nombre y Zapotitán tienen estudios geológicos preliminares y, figuran como campos potenciales.

Durante la primera fase del Proyecto geotérmico del PNUD, se perforaron 5 pozos exploratorios profundos, 4 de los cuales resultaron productores, 3 de ellos con temperaturas superiores a los 220°C.

Después de este éxito parcial, se obtuvo de Naciones Unidas ayuda para la 2a. fase del Proyecto, cuyas investigaciones se concentraron en el área de Ahuachapán, donde se perforaron 5 pozos más del mismo tipo de la fase anterior, de los cuales 3 resultaron productores, uno con excelente temperatura pero de baja permeabilidad y otro que se perforó para reinyección con resultado negativo debido a la misma causa anterior.

En resumen, en el año de 1970 la CEL contaba con 4 pozos productores en el Campo de Ahuachapán, considerando por lo tanto que el proyecto constituía un éxito.

En los años 1970-1971, se efectuaron las primeras pruebas de reinyección en el Campo de Ahuachapán, siendo éstas las primeras que se realizaban en gran escala en todo el mundo.

Los Consultores Kingston, Reynolds, Tomm and Allardice, fueron encargados de realizar el estudio de factibilidad del Campo geotérmico de Ahuachapán para su utilización en la generación eléctrica. Como resultado de éste se recomendó la instalación de la central geotérmica eléctrica.

Hacia 1971 se inició el desarrollo del campo, la construcción y el montaje de la 1a. Unidad generadora. La operación comercial del campo Ahuachapán se inició en Junio de 1975, seguidamente en el año 1976 se instaló la 2a. Unidad y finalmente en 1981 concluyó el proyecto, con la entrada en operación de la 3a. Unidad, completando un total de 95 MW de Potencia Instalada.

El costo de las 3 unidades fue de US\$ 96 millones, los cuales a los 21 días de la inauguración de la 3a. Unidad se habían retribuido en concepto de economía de petróleo ahorrado en las plantas térmicas convencionales del país.

2. ESTADO DE AVANCE DE LOS ESTUDIOS EN CADA AREA

Como puede apreciarse en el mapa adjunto, existen muchas manifestaciones geotérmicas, en el territorio nacional, destacándose entre ellas las correspondientes a los campos geotérmicos de Ahuachapán, Chipilapa, San Vicente, Berlín y Chinameca.

Campo Geotérmico de Ahuachapán

Existe un programa continuo de investigaciones, tendiente a definir el modelo geológico del campo en general, incluyendo las zonas de recarga hídrica. Los estudios que se realizan son los siguientes:

a) Radio-isótopos estables y trazadores

Los radio-isótopos estables nos permitirán conocer con mejor detalle las edades de las rocas y fluidos geotérmicos, así como la posible zona de recarga. Los trazadores nos permitirán conocer los canales preferenciales por los que circula el agua, especialmente la de reinyección.

b) Se harán además, dos campañas geofísicas en la zona Sur del campo: una de microgravimetría y la otra magnetotelúrica. El objetivo principal de ambas es ubicar la zona de recarga del reservorio y localizar pozos de reinyección. Con estas mediciones, combinadas con las radioisotópicas, se espera tener un modelo geológico real del campo, que nos permitirá hacer un modelo matemático para optimizar el régimen de explotación.

c) Además se perforarán nuevos pozos que serán conectados a la central y cuya ubicación lejana permitirá, atenuar la extracción de fluido en la actual zona de explotación.

Campo Geotérmico Berlín

Los estudios en Berlín se encuentran bastante adelantados, existiendo

en el momento actual seis pozos profundos y dos someros.

Los resultados son altamente satisfactorios. Las características de los pozos exploración-producción son las siguientes:

<u>NO.</u>	<u>PROF.</u>	<u>FECHA PERF.</u>	<u>T°C</u>	<u>PRODUCCION</u>	<u>NOTAS</u>
Tr-1	1424	1968	240	baja	No llego al reservorio
Tr-2	1903	1978	300	113T/h vapor	Excelente
Tr-3	2300	1979	290	45T/h vapor	Bueno
Tr-4	2375	1980	300	No se ha podido inducir	
Tr-5	2300	1980	300	No se ha podido inducir	
Tr-9	2083	1981	295	64T/h vapor	Muy bueno

Los últimos 5 pozos interceptaron dos reservorios, el primero a una profundidad de 800-900 metros y el segundo a 1800 metros de profundidad aproximadamente, con temperaturas del orden de 300°C. Las mediciones hechas para medir la potencialidad del campo no son muy confiables ya que se realizaron sin separador, sin embargo los pozos muestran todos buenas características.

Campo Geotérmico de Chinameca

Los estudios geocientíficos de este campo aún no han sido concluidos; los resultados preliminares muestran buenas perspectivas. Hasta la actual fecha se han perforado sobre las zonas de anomalías geotérmicas 4 pozos, 2 de pequeño diámetro y 2 de exploración profunda, siendo los resultados de estos últimos relativamente buenos.

Campo Geotérmico San Vicente

Los primeros estudios geológicos se realizaron en 1966, durante el Proyecto CEL-ONU. Desde el año 1976 a la fecha CEL ha realizado intensas

exploraciones en el área, habiendo concluido estas con la perforación de un pozo exploratorio profundo, el cual interceptó un reservorio cu ya temperatura de fondo es de 230°C. Se tiene planificado para un fu turo cercano la perforación de nuevos pozos y estudios complementarios de la fase de Factibilidad del Campo.

Campo Geotérmico Chipilapa

Este campo está ubicado muy próximo al de Ahuachapán, por lo que se puede considerar como una expansión del mismo.

Los primeros estudios de esta área fueron realizados por una misión geo lógica alemana, quienes trabajaron entre los años 1953-1961. Los estu dios consistieron en mediciones del flujo calorífico, geología general y algo de geoquímica y geofísica. Luego en 1965-1968, se hicieron estu dios más específicos, los cuales comprendieron: Geología, Geoquímica, pozos de gradiente de 1.5 m. y 100.0 m. de profundidad, magnetometría, gravimetría y resistividad eléctrica. Como resultado de esa cam paña, se localizó y perforó un pozo profundo, el cual dió muestras de poca permeabilidad y temperatura del orden de 220°C. Después se hicie ron (1973-1976) más estudios, especialmente sondeos eléctricos vertica les y se perforaron dos pozos de gradiente de 400 m. aproximadamente, uno de ellos alcanzó a esa profundidad 220°C.

Los estudios que se están realizando en la actualidad son una comproba ción de las investigaciones efectuadas anteriormente y comprenden los siguientes aspectos: flujo calorífico, prospección de mercurio y de radón, análisis geoquímicos de aguas, vapores, gases y rocas, geología, fotogeología, vulcanología, gravimetría y resistividad eléctrica. Algunos resultados de estas investigaciones se sintetizan a continuación:

Resistividad Eléctrica

Más de 120 SEV fueron hechas a 500 metros de intervalo, distribuidos en

49 SEV en la campaña de 1981 en el campo de Ahuachapán y 77 SEV se han realizado hasta ahora para la campaña Chipilapa. La ubicación exacta de los SEV puede verse en el mapa EG-0070. El equipo utilizado es un McPhar Modelo 503 E. Los datos AB/2=300, 500, 750 y 1000 se utilizaron para elaborar mapas de isorresistividad aparente.

Es importante destacar que las curvas de campo que alcanzaron el reser vorio son del tipo K-H, en donde la parte final de la curva tiene una pendiente mayor de 45° a partir de AB/2=750, lo que la hace teóricamente ininterpretable en la parte final.

Los mapas de isorresistividad aparente para valores de AB/2=300 presen tan una fuerte correspondencia entre la información estructural discon tinua y las variaciones de los valores de la resistividad aparente, al grado de separar ambos campos en zonas de baja resistividad. Para los valores de AB/2=750, los campos aparecen "comunicados" por la anomalía de 10 ohmios metro, para AB/2=1000 ya no es posible la diferenciación entre ambos campos. Dos anomalías de alta resistividad persisten en todos los mapas; éstos son un límite al Sur-Oeste del pozo Ah-8 y Ah-9 del campo de Ahuachapán, y la otra es una anomalía de alta resistividad en la zona del Río Nuevo.

Magnetometría

Información significativamente útil puede ser obtenida acerca de la es tructura de un reservorio geotérmico a través de una prospección magné tica.

Más de 1400 puntos se han medido en la cuadrícula de Chipilapa con un magnetómetro portátil Geometrics G-816, que mide la intensidad total del campo magnético. Usando una estación base, medida con el mismo equi po, se calculó las anomalías magnéticas sin corrección diurna. Los datos se presentan como anomalías positivas y negativas en el mapa de contornos isomagnéticos (isogamas). Los datos de la magnetometría fue ron fuertemente afectados por los accidentes superficiales, por lo que su interpretación se dificultó enormemente.

Discusión

Es ya conocido que para el reservorio de Ahuachapán la producción del fluido en los pozos es debido a la permeabilidad secundaria, ya que la permeabilidad primaria resulta muy baja según reporte de física de rocas. Las medidas de resistividad eléctrica para aberturas medias de electrodos de corrientes menores que 750 m. muestran relación con la estructura discontinua, lo que hace que para ubicar pozos de producción deba en principio intentarse interceptar fallas por las cuales circule el fluido geotérmico; éste es el caso para Ahuachapán, sin embargo, debo advertir que la anomalía de baja resistividad de 5 ohmios metro del campo geotérmico de Ahuachapán hace lucir que en Ahuachapán existe un reservorio más grande. Eso en parte es verdad puesto que al Oeste del Río Los Ausoles la anomalía de baja resistividad es más grande y representa la parte más vieja del reservorio, la que está más alterada y ha acumulado más minerales conductivos durante la actividad hidrotermal; en otras palabras, la actividad del reservorio de Ahuachapán se ha desplazado al Nor-Este en donde se encuentra el actual sitio de explotación. La parte más alterada del campo es todavía fuertemente activa como lo ha demostrado el pozo Ah-8 y con seguridad, contribuye con una cuota de fluido hidrotermal al actual sitio de explotación. Por lo tanto, los fenómenos de subsistencia debidos a la explotación de Ahuachapán se espera que ocurran en la zona de 5 ohmios metro, que es la más alterada y la más débil. Recientes noticias de "deslizamientos" de tierras ocurridos en esa zona parecen confirmar esta tesis. Entre el campo de Ahuachapán y Chipilapa se muestra un bloque resistivo que concuerda con el aspecto estructural discontinuo de la zona y que confirma una pobre comunicación de flujo entre ambos campos.

El campo de Chipilapa aparece en la geofísica como una gran anomalía de 10 ohmios metro y otra pequeña de 5 ohmios metro, en magnífica coincidencia con el sistema estructural dominado por las discontinuidades: prolongación de la falla Río Escalante (Río Chipilapa) y la falla La-Capilla.

En la magnetometría, la anomalía negativa está en perfecta coincidencia con la anomalía de baja resistividad.

El hecho significativo que la anomalía de 10 ohmios metro es más grande que la de Ahuachapán o que la anomalía de 5 ohmios metro es más pequeña en Chipilapa, podrían indicar una sustancial diferencia con Ahuachapán: El reservorio de Chipilapa es más grande y en Chipilapa no existe una extensa zona alterada vieja como la que hay en Ahuachapán, sin embargo el reporte geológico no estaba terminado al escribir el presente informe de avance, por lo que tendremos que esperar finalizar la exploración de Chipilapa para dar más luz a la magnitud del área en proyección del reservorio de Chipilapa.

Dos bloques resistivos aparecen en los flancos Nor-Este y Sur-Oeste de Chipilapa. El primero al Sur-Oeste que lo separa con Ahuachapán y el segundo al Nor-Este que coincide con la falla del Río El Tortuguero.

La resistividad eléctrica presenta problemas de interpretación en las curvas de campo debido al "Skin effect" y al efecto de acoplamiento.

Los datos obtenidos en Chipilapa para $AB=750$ y $AB/2=1000$ muestran una extensión de la anomalía de 10-20 ohmios metro en toda la zona. Este fenómeno no deberá interpretarse como una extensión en profundidad de los reservorios de la zona, si así fuera el caso, el pozo Ah-14 sería un buen productor. Es razonable pensar que para penetraciones teóricas de la corriente eléctrica mayores que $AB/2=500$, la estructura discontinua que conduce los fluidos sigue siendo dominante, por lo tanto, debemos pensar en una extrapolación en profundidad de las condiciones para $AB/2=500$. A profundidades mayores el "Skin effect" y el efecto de acoplamiento, además de la mayor temperatura y saturación de las formaciones, no hacen posible obtener una mejor resolución en las medidas de resistividad eléctrica.

Conclusiones sobre el Campo Chipilapa

- a) El Campo Geotérmico de Chipilapa y su estructura discontinua están delineados por los contornos de isorresistividad aparente.
- b) No existen fuertes evidencias de interconexión de flujo del fluido hidrotermal entre el reservorio de Ahuachapán y el Campo de Chipilapa. Sin embargo, la fuente de calor parece ser la misma.
- c) Para el campo de Chipilapa, el fluido geotérmico tiene una dirección preferencial de sur a norte, conducido principalmente por las fallas Río Escalante y Falla La Capilla. A fin de interceptar los fluidos en esa dirección, se han propuesto tres zonas para la perforación.

Las zonas propuestas tienen como radio 200 metros. Existen fallas con orientación SW-NE, que son buenos prospectos, sin embargo se debe insistir en que la primera fase de perforación se investigue las fallas productoras con orientación S-N.

3. MAYORES PROBLEMAS ENCONTRADOS

El principal problema que detectamos, como una consecuencia socio-política nacional e internacional, es la dificultad para conseguir fondos para financiar los proyectos que requiere el desarrollo del recurso geotérmico; no obstante, para el futuro próximo existe la posibilidad de conseguir fondos con el Fondo de Inversiones de Venezuela y el Gobierno de Bélgica.

En el Campo de Ahuachapán tenemos problemas relacionados con la explotación del campo; todos los pozos de producción actualmente conectados a la central, están ubicado en un área de 0.6 km²., por lo que aparentemente éste está sobrediseñado. Se han recomendado estudios que de realizarse, podrían darnos modelos geológicos y matemáticos confiables, tanto para alcanzar la producción constante de la planta hasta la capacidad instalada de 95 MW, como para que la reinyección se efectúe en la

zona donde produzca beneficios y no haya interrogantes sobre la ubicación de ella.

Otro problema, referido al mismo campo de Ahuachapán, es que no se dispone para su explotación de todo el equipo que es necesario para el mantenimiento efectivo del campo; se tiene equipo para mantenimiento preventivo, pero faltan: bomba para controlar pozos o para matarlos y hacer mediciones dentro del agujero; camión grúa para diversos trabajos; equipo para aire comprimido para inducir los pozos; y un equipo de perforación para mantenimiento de los pozos en operación y para perforar nuevos pozos.

4. PRINCIPALES NECESIDADES

Lo que es más necesario para un campo como Ahuachapán, con ocho años de explotación y pozos perforados hace quince años, es un equipo perforador que permita realizar las reparaciones que serán frecuentes en breve tiempo. Nos referimos a un equipo con capacidad de unos 1000 m. de profundidad con barras de perforación de 4" O.D.

Hace falta también, equipos de prospección para realizar mediciones de detalle exactas y poder llegar a conclusiones en varias interrogantes que se tienen.

Se necesita además, hacer registros dentro de los pozos ya perforados para saber el estado actual, y en los pozos en perforación para las mediciones de entubamiento.

5. RECURSOS HUMANOS DISPONIBLES

La Superintendencia de Recursos Geotérmicos es la responsable de todo el quehacer en los estudios, exploración y explotación del recurso geotérmico, e incluye en su organización tres secciones para cubrir dichos

trabajos.

Los recursos humanos de que se dispone son de gran valía, casi todos los ingenieros y técnicos tienen amplia experiencia en las distintas disciplinas y muchos de ellos han recibido cursos en varios países extranjeros como Italia, México, Venezuela, Ecuador, Nueva Zelanda y otros, además del firme apoyo dado por CEL para la tecnificación de nuestro personal y la exigencia en todos nuestros contratos de transferencia de tecnología.

Consideramos que la falla del recurso humano se manifiesta en lo referente a ingeniería de reservorio y en la capacidad de perforación y mantenimiento de pozos.

6. PROGRAMAS PREVISTOS DENTRO DE LOS PROXIMOS CINCO AÑOS

Conocedores de los grandes beneficios económicos derivados de la generación de electricidad con recursos naturales, como lo es la energía endógena, la CEL ha mantenido la política de incluir en sus planes de equipamiento eléctrico el desarrollo de proyectos de generación eléctrica con recursos geotérmicos.

Los costos medios de generación por tipo de central, en El Salvador, se establecen así, en Colones/Kwh:

AÑO	HIDRO	TERMICA	GEOTERMICA
1971	0.0070	0.0207	-----
1975	0.0104	0.0715	0.0124
1980	0.0139	0.4159	0.0291
1982	0.0205	0.3030	0.0383

Nota: Cambio oficial del Colón 2.50 / dólar.

De acuerdo con el plan de expansión del Sistema CEL en el período 1984-

1992, se proyecta incorporar las siguientes Unidades de Generación:

San Lorenzo II	Hidro	90 MW	1984
San Miguel	Térmica	22 MW	1984
Berlín I	Geotérmica	55 MW	1989
Chipilapa I	Geotérmica	55 MW	1991
Berlín II	Geotérmica	55 MW	1992

De donde se concluye que el 33.0% de la capacidad a instalarse en el período 1984-1989 será por generación geotérmica y en el período 1984-1992 será del 59.6%.

7. INCIDENCIA DE LA GEOTERMIA EN EL SECTOR ENERGIA

En la República de El Salvador, el sector energía está conformado para el año 1982, de la siguiente manera:

Estructura por Sectores de Consumo

Industrial	16.5%
Residencia y Comercial	67.7
Transporte	14.2
Gobierno	0.9
Otros	0.7
	<hr/>
	100.0

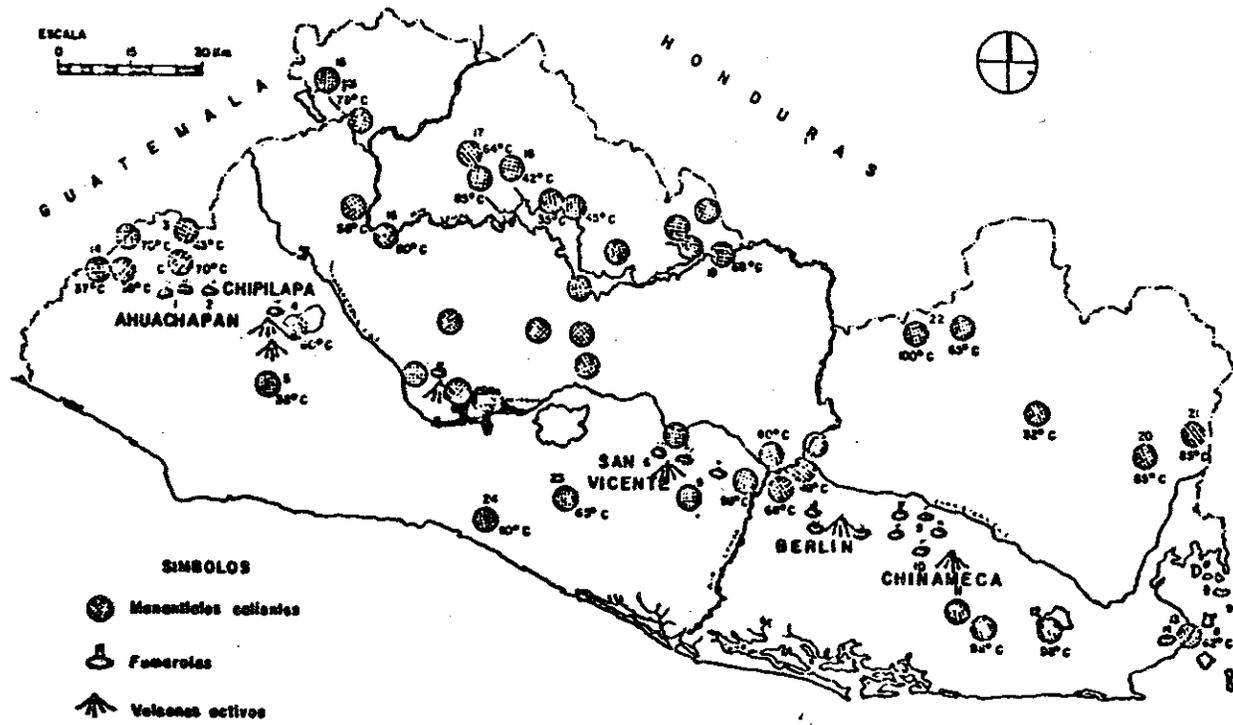
Estructura por Formas de Energía

Leña	64.8%
Derivados de Petróleo	24.2
Residuos Vegetales	5.5
Electricidad	5.4
Otros	0.1
	<hr/>
	100.0

En el subsector de energía eléctrica, la generación geotérmica ha ocupado un destacado lugar desde su incorporación masiva al sistema a partir del año 1977, llegando a significar desde el 25% al 44% del total de la generación eléctrica nacional. En términos de energía, la geotérmica representará del orden de 74% y 25% del incremento correspondiente a los períodos 1984-1989 y 1984-1992, respectivamente.

La posibilidad de incorporar nuevas centrales al sistema nacional de electricidad, incidirá positivamente en las finanzas de la institución y permitirá continuar la capacitación localmente de nuestros recursos humanos, a la vez que permitirá contribuir al desarrollo tecnológico de las disciplinas asociadas a la explotación del recurso geotérmico.

Fuente: Estudios Geotérmicos



MAPA DE UBICACION DE ZONAS DE INTERES

2.8. DESARROLLO GEOTERMICO EN GUATEMALA

Instituto Nacional de Electrificación, INDE
Guatemala, Guatemala

1. INTRODUCCION

La energía geotérmica se define convencionalmente como la energía calorífica contenida en el interior de la corteza terrestre, su origen según la hipótesis más generalizada, se debe a la desintegración atómica de materiales radiactivos que por las grandes presiones y temperaturas funde las rocas formando el magma; saliendo a la superficie a través de fracturas de la corteza terrestre.

Por condiciones tectónicas, estratigráficas y de presión, el magma no siempre logra alcanzar la superficie, quedándose atrapado a relativamente poca profundidad, irradiando su calor hacia los estratos más someros, en donde circula el agua subterránea y dando origen a un acúmulo de fluidos hidrotermales (ver Fig. No. 1).

Las zonas de debilidad de la corteza terrestre, como son el contacto de las placas tectónicas, se caracterizan por ser zonas sísmicas y en donde se localiza la mayoría de los volcanes activos. Una de estas zonas se denomina Círculo del Fuego o Círculo del Pacífico y pasa en el Continente Americano desde la Tierra del Fuego hasta Alaska (ver Fig. No.2). En estas zonas se encuentran las áreas más promisorias para el desarrollo geotérmico, como son California, México, El Salvador, Filipinas, Japón, Nueva Zelandia, Indonesia, Italia, Islandia, en donde se han instalado una capacidad un poco mayor a 2.000 MW; representando un equivalente en petróleo cerca de 100.000 barriles diarios de producción.

La Cadena Volcánica Centroamericana atraviesa Guatemala de noroeste a suroeste, en una faja convexa hacia el Pacífico de unos 40 kilómetros de ancho en promedio, en donde existen 35 volcanes, 3 de los cuales aún están activos con erupciones frecuentes, (Fuego, Santiaguito, Pacaya). Las erupciones volcánicas en la Era Terciaria se caracterizaron por ser principalmente fisurales, mientras que en el cuaternario han sido generalmente por medio de centros volcánicos (ver fig. 3).

2. AREAS GEOTERMICAS ESTUDIADAS (Fig. No. 4)

2.1 Campo Geotérmico de Moyuta

Las investigaciones geotérmicas se iniciaron en Guatemala en el año de 1972, en el área de Moyuta, situada en el Oriente del país, habiendo realizado prospecciones geológicas, geoquímicas, geofísicas y la perforación de 2 pozos exploratorios de hasta 1.000 mts. de profundidad.

Los resultados obtenidos indicaron que en el área perforada, la temperatura máxima medida es de 114°C, requiriéndose para la generación de energía eléctrica que ésta fuera de más de 180°C, razón por la cual se decidió dejar en suspenso la perforación de otros pozos adicionales. Las investigaciones geoquímicas de los nacimientos termales no aportaron información de la posible temperatura del subsuelo, debido a fenómenos de dilución con aguas superficiales, mientras que análisis de gases no condensables mostraban alta temperatura.

El gradiente geotérmico medido en los pozos exploratorios son fuertes hasta unos 200 metros de profundidad y luego sufre una inversión. Esto se debe a un flujo lateral, o sea al esparcimiento del agua caliente a través de los contactos geológicos horizontales, debiendo existir un conducto que conecta zonas profundas de mayor temperatura, desde donde los fluidos hidrotermales ascienden hasta

alcanzar los horizontes superficiales citados.

Los métodos de exploración empleados detectaron la anomalía térmica, pero no fue posible ubicar el área de ascensión vertical, por lo que teniendo una extensión favorable de 16 km²., su delimitación sólo es posible por medio de perforaciones profundas, que lo gren atravesar la aureola térmica superficial.

2.2. Campo Geotérmico de Zunil

El Campo Geotérmico de Zunil se localiza en el occidente del país en el municipio del mismo nombre, en el Departamento de Quetzaltenango. Los trabajos preliminares se ejecutaron en forma esporádica entre 1973 y 1977 con asistencia técnica del Gobierno del Japón, que envió tres misiones para realizar los estudios preliminares, y prospecciones eléctricas y sísmicas de reflexión y refracción para detectar el basamento granodiorítico.

En 1977 el INDE emprendió la ejecución de los estudios del Campo Geotérmico en Zunil en forma sistematizada a nivel de factibilidad preliminar, definiendo el área promisoría para llevar a cabo el programa de perforación exploratoria profunda y determinar la existencia de vapor natural en cantidades comerciales, que pudieran justificar la instalación de la primera Unidad Geotérmica.

La temperatura máxima medida es de 287°C, a 1.130 mts. de profundidad.

Se ejecutaron 6 perforaciones exploratorias profundas, 5 de las cuales producen vapor en cantidades comerciales y tienen una capacidad de conjunto de 13 MW. La evaluación de reservorio, llevada a cabo por medio de la simulación de operación del modelo matemático del área de influencia de las perforaciones, indica que existe una potencia probada de 15 MW., de suficiente duración para abastecer la central durante el período de su vida útil y que los

parámetros de presión y temperatura del fluido permanecen dentro de los límites prácticos de utilización.

2.3. Campo Geotérmico de Amatitlán

Se localiza al sureste del municipio del mismo nombre, en el departamento de Guatemala. Los trabajos que se están ejecutando son a nivel de factibilidad preliminar, e incluyen un programa de perforación de pozos de diámetro reducido de propósito múltiple para definir: el gradiente térmico, la estratigrafía del área, así como si es posible, detectar fluidos endógenos y obtener información más completa del reservorio. Se ha observado una temperatura máxima de 140°C a 80 mts. de profundidad y de acuerdo a los indicadores geotérmicos obtenidos del análisis químico de las aguas termales del área y de modelos de dilución, la temperatura máxima puede ser de 280°C.

Por las condiciones tectónicas y genéticas, así como por la actividad volcánica presente y por las características estudiadas, el área del campo geotérmico de Amatitlán, es uno de los más promisorios en Guatemala, en el cual el INDE está volcando todos los esfuerzos para llevar adelante las labores investigativas.

2.4. Estudio Regional

Con el objeto de obtener un panorama a nivel nacional de los recursos geotérmicos con que cuenta Guatemala, así como para definir la prioridad de ejecución de las investigaciones de las distintas áreas delimitadas en el país, se llevó a cabo un programa vulcanológico y geoquímico regional de toda la provincia volcánica y en aquellas regiones en donde se localizan manifestaciones geotermiales, llegándose a obtener un esquema que se debe seguir posteriormente a las investigaciones que se lleven a cabo en Zunil y Amatitlán.

3. INVESTIGACIONES GEOTERMICAS DE ZUNIL

En el estudio del Campo Geotérmico de Zunil, se han llevado a cabo investigaciones geocientíficas, mediante la aplicación de todas las ciencias y técnicas desarrolladas en los últimos 20 años para localizar y evaluar la capacidad del reservorio.

3.1 Estudios Preliminares

3.1.1. Vulcanología

Los estudios preliminares consistieron básicamente en la localización de la fuente calorífica, de acuerdo a la vulcanología de la región, en donde se encuentran los volcanes de Santa María, Santiaguito y Cerro Quemado.

El volcán de Santa María hizo una erupción violenta en el año de 1902, lanzando al espacio, en cuestión de minutos, unos 3 kilómetros cúbicos de material, destruyendo su flanco suroeste. Luego en 1925 precedido de una intensa actividad sísmica, se comenzó a formar dentro de las ruinas de 1902, el domo volcánico, tipo Peleano, denominado Santiaguito, que en el transcurso de 50 años ha crecido más de 500 mts.

El volcán Cerro Quemado tuvo su última erupción en el año 1818 y es, principalmente un domo volcánico.

El alineamiento noreste formado por los volcanes de Santiaguito, Santa María y Cerro Quemado se interrumpe en el norte por una cadena de domos volcánicos, como la Pedrera, Tecún Umán, Huitán y otros.

Los estudios vulcanológicos indican que en la cámara magmática ha habido una diferenciación por sedimentación de material más denso y que el material más liviano ha sido expulsado, en base a lo cual se deduce que la cámara magmática tiene un largo período de haberse formado y por consiguiente, el hecho de la existencia de mani-

festaciones geotérmicas (fumarolas, geiseres, nacimientos termales), indican que el calor ha sido irradiado hacia la superficie.

3.1.2. Geoquímica

El muestreo y análisis de nacimientos termales en el área, indicó en base a su composición química y a modelos de dilución que la temperatura del subsuelo es mayor a de 200°C, por lo cual se concluyó inicialmente que en el área de Zunil, habían suficientes elementos de juicio para continuar las investigaciones a un nivel mayor.

3.2. Estudios a nivel de factibilidad preliminar y resultados obtenidos a nivel de factibilidad

Los estudios a nivel de factibilidad preliminar tienen como objetivo definir el área promisoría, tanto en planta como en sección vertical, en donde se localiza el reservorio geotérmico.

3.2.1. Estudios geológicos y vulcanológicos

El área cubierta por estos estudios fue de 980 km²., (ver Fig. No. 5).

El basamento granodiorítico, de edad cretácica se interceptó en el área explorada por medio de perforaciones, a profundidades entre 700 y 1.000 metros, con un hundimiento hacia el noreste (Fig. No. 9). Parte de la producción de vapor se localiza en esta zona de discordancia.

El complejo de rocas terciarias, constituido por andesitas piroxénicas, toba, y brechas tobáceas, tobas riolíticas, tobas soldadas, lahares, flujos de basalto, etc., se encuentran al este del río Samalá, al norte de la falla de Olintepeque y al oeste de la falla de San Martín Jilotepeque y con un afloramiento al oeste del Vol-

cán de Santa María. El máximo espesor medido en el área explorada alcanza 425 metros, considerándose que esta formación constituye el reservorio del campo geotérmico de Zunil, conjuntamente con la zona de discordancia.

El complejo de rocas cuaternarias se localiza entre las fallas de Olinstepeque, en el Norte, la falla de Samalá al este y la falla de San Martín Jilotepeque en el oeste. Esta formación constituye la capa sello del reservorio y sus centros de emisión están muy difundidos, siendo los principales el volcán Santa María, Cerro Quemado y el Complejo Dómico de el Bául, la Pedrera y Cerro Huitán.

3.2.2. Prospecciones Geofísicas

Las prospecciones geofísicas tratan de identificar fenómenos físicos debidos a la acción del calor sobre las formaciones geológicas, estas se basan en los métodos gravimétricos, magnéticos y eléctricos (resistividad).

Como se sabe, el incremento de temperatura provoca dilatación de los cuerpos, es decir que su densidad disminuye, por lo que la atracción de masas también se ve afectada, provocando cambios en la gravedad. Estos cambios se pueden detectar por medio de un aparato denominado gravímetro, que consiste principalmente en un peso muy pequeño, sostenido por un resorte de cuarzo. El gravímetro detecta cambios de décimas de miligal, siendo un gal igual a $1/\text{Cm}/\text{Seg}^2$.

A las lecturas gravimétricas se les hace las correcciones de Bouguer y el resultado se representa en planos con curvas de éstas. En la figura 7, se muestra el plano de anomalías de Bouguer, observando una depresión relativa del basamento entre Zunil y el Cerro El Galápagó, en donde se ha localizado el reservorio geotérmico.

La prospección magnética se basa en que con el incremento de temperatura, el magnetismo natural de las rocas disminuye, por lo que con un magnetómetro es posible detectar las zonas probables de mayor calor relativo. En la Figura No. 8 se observa el plano con curvas de anomalía magnética residual, correspondiendo a la zona negativa situada al suroeste de la población de Zunil, en donde se ha localizado vapor geotérmico.

La resistividad de las rocas tiende a disminuir con el incremento de temperatura, por lo que las zonas de baja resistividad eléctrica pueden estar asociadas con zonas productoras de vapor. En la figura No. 9 se tiene el plano de isoresistividad eléctrica a 1.000 metros de profundidad, correspondiendo la anomalía eléctrica situada al suroeste de la población de Zunil a la zona productora de vapor.

3.2.3. Perforaciones exploratorias

Las perforaciones exploratorias tienen como objetivo: definir la estratigrafía geológica, determinar el gradiente térmico y la temperatura del reservorio geotérmico, interceptar flujos hidrotermales que permitan analizar su composición química y sus características termodinámicas.

Las perforaciones exploratorias son de dos clases: de diámetro reducido y profundas de gran diámetro; las primeras se llevaron a cabo en la fase de factibilidad preliminar, alcanzando una profundidad máxima de 645.62 metros en el pozo Z 2. En ellas se midió una temperatura máxima de 256°C y se encontraron fluidos geotérmicos de características favorables para su utilización en la generación de energía eléctrica. De este tipo de pozos se ha perforado hasta la fecha una longitud total de 5180.79 mt., los cuales han servido también para delimitar el área de perforación profunda.

Las perforaciones exploratorias profundas se llevaron a cabo en base a los resultados obtenidos en la fase de factibilidad preliminar, habiéndose

dose realizado 6 perforaciones, hasta de un máximo de 1310.10 metros, con el objeto de atravesar las formaciones cuaternarias y terciarias, así como para comprobar plenamente la presencia del basamento granodiorítico y la zona de discordancia existente entre esta formación y las rocas terciarias.

El programa típico de perforación puede observarse en la figura No. 10. Se inicia con un diámetro de 26" hasta atravesar los depósitos aluviales y se coloca una tubería de revestimiento de 20" OD, completamente cementada en el espacio anular. Luego se continúa con un diámetro de 17 1/2", con colocación de una tubería de anclaje de 13 3/8" OD, también cementada en su espacio anular. Sobre esta tubería se hace el armado del cabezal del pozo mediante la colocación de las bridas correspondientes a la clase de válvula maestra que se utiliza. La profundidad de colocación de la tubería de anclaje se selecciona de acuerdo a las características mecánicas de la formación geológica en que se ancla, y en el caso de los pozos de Zunil, esta ha quedado entre 200-350 mts. de profundidad. Luego se continúa la perforación con un diámetro de 12 1/4" hasta una profundidad aproximada de 450-750 metros, dependiendo ésta de la intercepción de una pérdida de circulación. Dentro de este agujero se coloca la tubería de producción de 9 5/8" OD de diámetro, la cual es cementada hasta la superficie mediante el espacio anular. Normalmente la zona permeable indicada por las pérdidas de circulación se localizan en la parte inferior de las rocas cuaternarias. La formación reservorio, complejo terciario, es perforada con un diámetro de 8 1/2", penetrando esta hasta la zona de discordancia del basamento cretácico y asegurándose que se perforaba lo suficiente para completar estudios de gradiente e investigar el fracturamiento cortical de la granodiorita. La tubería ranurada de 7 5/8" OD para proteger de derrumbes, se colocó suspendiéndola con un colgador en el tramo inferior de la tubería de 9 5/8", hasta una profundidad que osciló entre 800 y 1.135 metros.

Las perforaciones de diámetro comercial se ejecutaron con un equipo rotatorio marca Fred Cooper, con capacidad de sostener un peso de 90 to-

neladas métricas en su torre de perforación y perforar eficientemente hasta 1.500 metros de profundidad con un diámetro de 8 1/2". La evacuación a la superficie de los detritus de perforación, hasta antes de llegar al reservorio, se efectuó bombeando una solución de agua y bentonita. El lodo de perforación fue tratado con aditivos químicos para mantener la densidad y viscosidad. La perforación del reservorio, en el cual por lo general se perdió la circulación del lodo, se realizó exclusivamente con agua, con el fin de evitar sellar la permeabilidad de las rocas.

En el cuadro No. 1, se observa el resumen de los pozos exploratorios profundos del campo geotérmico de Zunil.

3.2.4. Control de los Pozos durante la Perforación

En el transcurso de la perforación se lleva a cabo el monitoreo de:

- Recortes de perforación para su clasificación litológica, estratigráfica y determinación de minerales de alteración hidrotermal (ver Fig. No. 11).
- Fluidos de perforación para mantenerlos dentro de los límites óptimos de densidad, viscosidad, P.H., formación de costra, pérdida de agua y filtración. También se efectúan in situ, análisis químicos de cloruros que identifiquen la contaminación de aguas termales profundas.
- Temperatura de entrada y salida de los fluidos de perforación.
- Control de pérdidas de circulación de fluidos de perforación.
- Parámetros de perforación, como peso sobre la broca, revoluciones por minuto y avance por hora.

3.2.5. Pruebas de Inyectabilidad

Al concluir la perforación se procede a hacer la prueba de inyectabilidad, la cual consiste en determinar la cantidad de agua absorbida por unidad de incremento de presión de bombeo, y se expresa a litros/Seg./Kg./Cm². Esto es una indicación de permeabilidad cualitativa del pozo y se utiliza como comparación con otros pozos del mismo campo.

De acuerdo con las pruebas de inyectabilidad, los pozos exploratorios profundos de Zunil tuvieron los siguientes resultados:

POZO	I.I.	CAPACIDAD EVALUADA
ZCQ-1	0.50	1 MW
ZCQ-2	2.50	1.8 MW
ZCQ-3	2.69	3.0 MW
ZCQ-4	5.4	4.3 MW
ZCQ-5	---	3.9 MW
ZCQ-6	2.24	3.0 MW

3.2.6. Calentamiento del Pozo

Luego se procede a la observación del pozo durante el período de calentamiento, midiendo continuamente el perfil de temperatura, el nivel piezométrico del pozo y la presión de cabezal.

En la figura No. 11 se pueden ver las curvas de temperatura en condición estática del pozo ZCQ-3, la T-4 al inicio del calentamiento y la T-10 cuando ya ha alcanzado la temperatura de estabilización.

Durante el proceso de calentamiento del pozo, la presión en el cabezal se incrementa paulatinamente. En las curvas P-9 y P-25 de la figura No. 11, se ve que el pozo ZCQ-3 ha alcanzado valores de 42 y 46 Kg/cm², siendo su presión inicial antes del calentamiento, equivalente a la presión atmosférica local.

3.2.7. Apertura del Pozo Geotérmico

La apertura de un pozo geotérmico se efectúa cuando el fluido haya alcanzado, en el nivel piezométrico, la temperatura de ebullición y cuando en todo el largo de la columna, la temperatura sea igual o mayor a la temperatura de ebullición correspondiente a la presión hidrostática y que la presión en la cabeza del pozo se haya incrementado lo suficiente como para permitir el libre flujo del fluido.

Si las condiciones anteriores no se cumplen del todo, entonces no es posible iniciar el flujo del fluido geotérmico; procediendo entonces a provocarlo artificialmente mediante la excitación, la cual puede hacerse por extracción mecánica del agua superficial fría, para que el agua más caliente en estado de ebullición ascienda hasta el nivel piezométrico. Este procedimiento es complicado porque el flujo se inicia con herramientas dentro del pozo, dificultando la maniobrabilidad. Otra manera práctica y sencilla, usualmente utilizada en los pozos geotérmicos de Zunil, consistió en la presurización mediante la inyección de aire comprimido. Con este procedimiento se abate el nivel piezométrico del pozo, logrando que el agua alcance zonas de mayor temperatura y se llegue a estado de ebullición. El flujo se inicia al abrir la válvula maestra.

3.2.8. Pruebas de producción

Las pruebas de producción se inician el momento de la apertura del pozo. El método empleado está basado en el que desarrolló experimentalmente Rousset James, de Nueva Zelanda, que consiste en hacer pasar el flujo del pozo a través de un orificio, colocado en una descarga horizontal como se ilustra en la Figura No. 12 y midiendo las presiones en los lugares indicados.

Las fórmulas fundamentales son:

$$\frac{G H_o^{1.102}}{P_c^{0.96}} = 11,400 \quad \text{FORMULA No. 1}$$

$$W = G A \quad \text{FORMULA No. 2}$$

$$W = K Y A \sqrt{2g (p_1 - p_2) p} \quad \text{FORMULA No. 3}$$

Para el cálculo de la densidad de la mezcla vapor agua se usa:

$$P = \frac{1}{X_m V_a + (1-X_m) V_v} \quad \text{FORMULA No. 4}$$

$$X_m = X^{1.5}$$

$$X = \frac{H_o - H_a}{H_m} \quad \text{FORMULA No. 5}$$

Con este procedimiento se obtiene la curva característica de producción como las que se observan en la figura No. 13, las cuales corresponden a los pozos productivos de Zunil.

El resultado de producción óptima de los pozos del campo geotérmico de Zunil se resumen en el cuadro No. 1.

3.2.9. Características químicas de los fluidos

Al mismo tiempo que se lleva el control y las pruebas de producción, se determinan los análisis químicos de la mezcla agua vapor, del condensado y de los gases no condensables, con el objeto de observar el comportamiento del reservorio en el transcurso del tiempo. Estos análisis son necesarios para el diseño de los materiales a utilizar en los diferentes componentes de la planta geotérmica y determinar el procedimiento de extracción de los gases no condensables.

En el cuadro No. 1 se resumen los análisis químicos obtenidos en los pozos perforados del campo geotérmico de Zunil.

3.2.10. Evaluación del Reservorio

Para evaluar la capacidad del reservorio se hace uso de la información obtenida durante las pruebas de producción, y de los parámetros de extensión del reservorio, temperatura, permeabilidad y porosidad, los cuales han sido recolectados en todas las fases de investigación anterior.

En la figura No. 14, se muestran algunas curvas adicionales que se obtienen dentro del pozo cuando está fluyendo como son: el perfil de presión dinámico, así como la recuperación de presión cuando el pozo se cierra.

Con la información recolectada se formula el modelo físico del reservorio y se simula matemáticamente su comportamiento, utilizando programas de computación desarrollados por ingenieros de reservorios.

El período analizado por simulación computarizada abarca 20 años, con lo cual se llega a la conclusión que con una unidad de 15 megavatios, el reservorio contenido del área explotado mediante pozos profundos, no sufre una merma considerable de presión y temperatura.

En la figura 15, se observa el resultado de la simulación. Inicialmente la presión desciende bruscamente, mientras la entalpía sube, esto se debe a un cambio en la mezcla agua-vapor hacia una mejor condición.

En fases sucesivas, cuando se tiene más información acumulada del reservorio, se comparan los mismos parámetros calculados con los reales, y se efectúan las correcciones correspondientes al modelo matemático del campo, para obtener resultados más afinados que permitan efectuar las ampliaciones de capacidad del campo al tener más área perforada.

4. PLANTA GEOTERMICA DE ZUNIL

En base a los resultados obtenidos en la investigación del campo geotérmico de Zunil, se ha decidido instalar la primera unidad geotérmica de 15 MW, para lo cual se elaboró el informe de factibilidad correspondiente.

Las características principales de la unidad son:

La operación debe ser de base (generación continua a plena carga), de manera de aprovechar sin modulación todo el vapor geotérmico disponible.

El paro temporal de la Central para períodos medio largos (2-3 semanas), puede ser conveniente cuando existan excesos hidroeléctricos por las siguientes razones:

La energía geotérmica puede considerarse como energía almacenada, y un consumo no necesario representa un desperdicio del recurso natural, aunque exista realimentación de agua y calor.

La inversión de una planta geotérmica son mayores a los de una térmica convencional, pero los costos de producción son menores, por lo que al requerirse energía de base es más económica la unidad geotérmica.

La conveniencia económica de las centrales geotérmicas respecto a las hidráulicas, depende de las características de cada una y de las inversiones. En general se puede observar que:

A igualdad de características e inversiones, la central hidráulica es más conveniente construirla, primero porque explota energía renovable, mientras la geotérmica es una energía almacenable que puede utilizarse cuando se considere apropiado.

La energía hidroeléctrica es limitada y la potencia adicional resulta oneroso, mientras las plantas geotérmicas puede fraccionarse su capacidad de acuerdo a la situación económica.

Las plantas hidroeléctricas y geotérmicas son complementarias entre sí. Las primeras pueden modularse para satisfacer las demandas horarias, mientras las geotérmicas se pueden utilizar como energía base.

El papel óptimo de la central geotérmica en el sistema eléctrico de Guatemala es intermedio entre las centrales hidroeléctricas y térmicas existentes, proporcionando energía firme y sustituyendo energía generada por plantas accionadas por combustibles fósiles derivados del petróleo.

4.1. Componentes de la Planta Geotérmica

La planta geotérmica de Zunil tendrá los siguientes componentes:

- Nueve pozos de hasta 1.300 mts. de profundidad, de los cuales 6 ya se perforaron, cada uno con su silenciador.
- Tuberías de transporte de vapor.
- Tuberías de transporte de agua caliente.
- Tuberías de transporte de flujo mixto.
- Separadores de agua vapor en los pozos productores de flujo mixto.
- Recolector de vapor.
- Deshumecedor.
- Casa de máquinas con su tubería, generador, protecciones, alarmas y sala de control para 15 MW.
- Sub-estación transformadora de 13.8 KV a 69 KV.

- Línea de transmisión de 4 Km. hacia la red de 69 KV.

4.2. Inversión Total para la Unidad de 15 MW - Millares Q

	MONEDA LOCAL	MONEDA EXTRANJERA	TOTAL
A. DESARROLLO DEL CAMPO			
1. Desembolsos ya efectuados incluidos los intereses hasta Enero/82	8.300	----	8.300
2. Adquisición de terreno	500	----	500
3. Perforación y pruebas de 3 pozos adicionales	500	2.500	3.000
Total para desarrollo del campo	9.300	2.500	11.800
B. CONSTRUCCION DE LA PLANTA			
Equipo electromecánico CIF:			
Tubería, generador, y condensador	----	4.300	4.300
Torre de enfriamiento, bombas y accesorios	----	1.150	1.150
Tubería en el campo y sistema de separación del vapor	----	2.100	2.100
Equipo eléctrico	----	500	500
Subestación eléctrica y transformadores	----	400	400
Auxiliares: Alimentación agua pura, grúa, contraincendio, aire comprimido	----	700	700
Sub-total 3	----	9.150	9.150
Montaje	1.500	600	2.100
Obra Civil	1.000	750	1.750
Canal de descarga al Río Samalá	250	100	350
Línea eléctrica	50	150	200

Ingeniería y Administración (12% del total 3+4+5+6+7)	600	1.000	1.600
Imprevistos (10% del total 3+4+5+6+7+8)	350	1.150	1.500
Total para la construcción de la planta	3.750	12.900	16.650

C. TOTAL DEL PROYECTO 13.050 15.000 28.450

4.3. Costo de la Energía Geotermoeléctrica

	TASA	6%	10%	14%
a. Inversión con interés durante la construcción	31.881	34.420	37.184	Millares US\$
b. Gasto Anual de Capital	2.780	4.041	5.611	Millares US\$
c. Gasto Anual de O & M	585	585	585	Millares US\$
d. Gasto Anual total (b+c)	3.365	4.626	6.196	Millares US\$
e. Generación Neta Anual		84		GWh
f. Costo de Generación	40.1	55.1	73.8	Mills./KWh

El costo total de generación geotérmica con tasa del 10% es inferior al costo parcial para el combustible de la generación térmica (65 Mills/KWh).

5. INVESTIGACIONES ADICIONALES EN ZUNIL

De acuerdo a los resultados obtenidos, se están ejecutando nuevas investigaciones al suroeste y noroeste del campo de Zunil, las cuales consisten en desarrollar programas de perforación profundas en el área de la etapa II (ver Fig. No. 16), ya que en esa dirección se ve que el reservorio continúa, como lo demuestran las curvas de isoterma del basamento (ver Fig. No. 17).

Además en el área de la etapa III, se están desarrollando actividades a

nivel de factibilidad preliminar, incrementándose una mayor densidad de sondeos eléctricos verticales para definir con mayor precisión, las anomalías geoelectricas encontradas en los Llanos del Pinal, en donde también se ejecutan perforaciones de diámetro reducido.

BIBLIOGRAFIA

1. Bethancourt, Hugo Rolando, 1978. Preliminary Commentaries on the Report of the United Nations Review Mission to Guatemala, Guatemala. INDE, 17 p.p.
2. ELC Electroconsult, Milano-Italia, INDE- Instituto Nacional de Electrificación, Guatemala, C.A. 1982, Proyecto Zunil. Evaluación del Potencial del Campo. Informe Final.
3. INDE - Estudios Geotérmicos, 1978 Proyecto Zunil: Informe de Factibilidad Preliminar, Guatemala.
- 3a. INDE - Instituto Nacional de Electrificación Guatemala C.A. ELC-Electroconsult, Milano-Italia, 1982. Primera Unidad Geotérmica, Campo Zunil, Quetzaltenango. Informe de Factibilidad.
4. James, Russell 1962. Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 176, No. 26, p.p. 741-748 Steam-Water Critical Flow through Pipers.
- 4a. James, Russell 1965-66. Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 180, No. 23, p.p. 549-572. Metering of Steam-Water Two Phase Flow by sharp-edged orificies.
- 4b. James, Russell 1970. Geothermics, Symposium on the Development of Geothermal Resources Piza, Vol. 2, Part 2, Pág. 1502-1515 Factors Controlling borehole performance.
5. Palma, Julio 1977. Geoelectric Inform IN., Guatemala, INDE Zunil Project, Preliminary Feasibility Study, Estudios Geotérmicos, Guatemala, O & M. Printing, 39 p.p.
6. Tobías, Edgar 1977, Geologic and Vulcanologic Inform, IN, Guatemala, INDE, Zunil Project Preliminary Feasibility Study, Estudios Geotérmicos Guatemala O. & M. Printing, 55 p.p.

- 6a. Tobías, Edgar 1978, Geologic Inform on Exploratory Boreholes of Small Diameter, IN., Guatemala INDE, Zunil Project, Preliminary Feasibility Study, Estudios Geotérmicos Guatemala, 41 p.p.
7. Urrutia, Jorge 1978. Geochemical Inform, IN., Guatemala INDE Zunil Project, Preliminary Feasibility Study, Estudios Geotérmicos, Guatemala, Q.& M. Printings, 59 p.p.

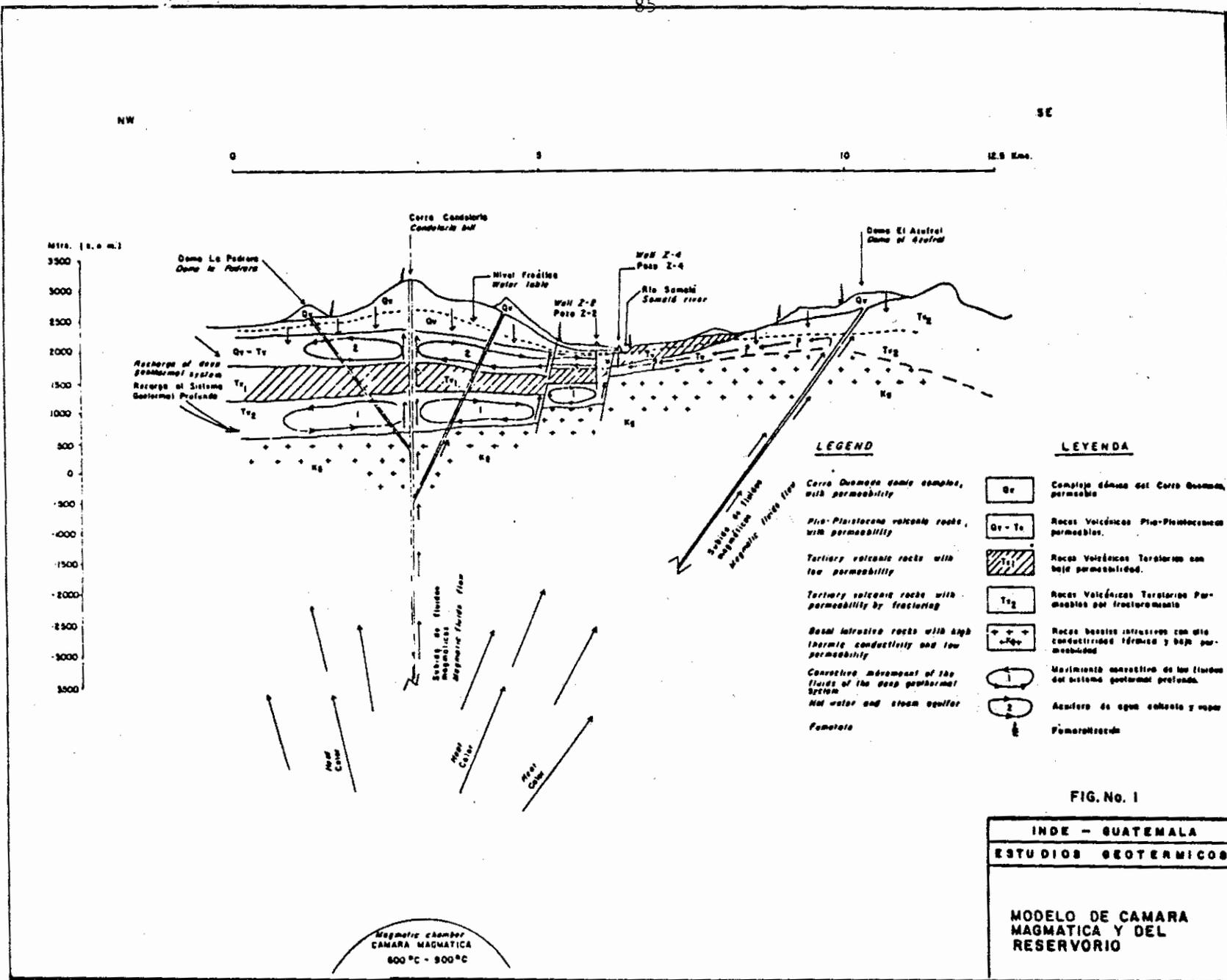
CUADRO RESUMEN DE LOS POZOS EXPLORATORIOS PROFUNDOS DEL CAMPO GEOTERMICO DE ZUNIL

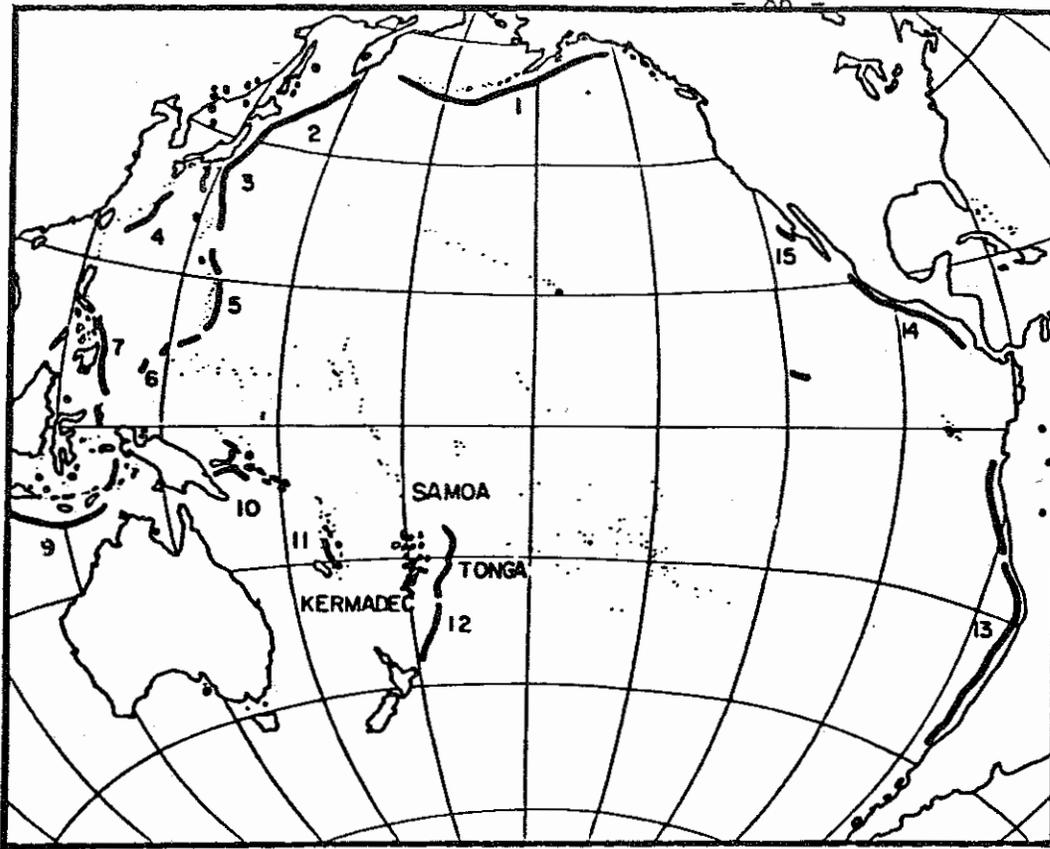
POZO No.	ZCQ - 1		ZCQ - 2		ZCQ - 3		ZCQ - 4		ZCQ - 5		ZCQ - 6	
COORDENADA												
X	E 1 M	81 25	81 28	80 85	80 75	80 28	80 28	80 28	80 28	80 28	80 28	80 28
Y	N 1 M	13 75	14 11	15 88	15 92	15 78	15 78	15 78	15 78	15 78	15 78	15 78
Z	M 4 A M	2004 44	2058 89	2077 05	2114 56	2173 13	2173 13	2173 13	2173 13	2173 13	2173 13	2173 13
PROFUNDIDAD TOTAL	m	1310 00	812 00	1041 50	1023 50	1078 80	1078 80	1078 80	1078 80	1078 80	1078 80	1142 20
FECHA DE INICIO		31 Enero 1980	30 Julio 1980	31 Julio 1980	11 Diciembre 1980	7 Abril 1981	28 Julio 1981					
FECHA DE FINALIZACION		7 Mayo 1980	17 Julio 1980	3 Septiembre 1980	31 Enero 1981	18 Julio 1981	18 Octubre 1981					
DIAMETRO DE POZO EN ZONA PRODUCTIVA	Pulgadas	8 3/4	8 1/2	8 1/2	8 1/2	8 1/2	8 1/2	8 1/2	8 1/2	8 1/2	8 1/2	8 1/2
RECORD DE CASING												
	PROF (m)	TIPO	PROF (m)	TIPO	PROF (m)	TIPO	PROF (m)	TIPO	PROF (m)	TIPO	PROF (m)	TIPO
20"	33 34	N-40	24 50	N-40 STC	24 00	N-40 STC	26 50	N-40 API	26 50	N-40 API	38 20	N-40 API
13 3/8"	223 50	K-55	203 32	K-55 Buttweld	204 00	L-80 Buttweld	232 80	K-55 API	148 00	K-55 API	298 44	K-55 API
8 7/8"	504 00	K-55	518 28	K-55 "	590 00	K-55 "	447 82	K-55 Buttweld	731 30	K-55 Buttweld	800 00	N-80, K-55, L-75
7 7/8"	-	-	469 00-78500	N-80	166 00-1038 00	N-80	42 002-1020 00	K-55, N-80	731 17-951 30	N-80 FJP	550 00-1150 00	N-80
CARACTERISTICAS DE PRODUCCION							VAPOR SECO	MEZCLA	(VAPOR SECO)			
PRESION DE CIERRE	Kg/cm ² g	-	9 16	21 08	27 43	27 43	27 43	27 43	23 20	23 20	17 6	17 6
PRESION DE CABEZAL	"	-	5 98	6 35	7 38	15 01	15 01	15 01	5 42	5 42	1 31	1 31
ENTHALPIA	KCal/Kg	-	282 0	243 0	-	158 2	-	158 2	-	-	136 7	136 7
FLUJO TOTAL	T/M	-	74 8	145 0	-	127 8	-	127 8	32 1	32 1	68 4	68 4
CAPACIDAD CORRESPOND	KW	-	1805 00	1000 0	-	831 0	-	831 0	388 0	388 0	1023 0	1023 0
INFECTIVIDAD	LI/Seg/ha/h	0 5	2 5	2 88	-	5 40	-	5 40	-	-	2 24	2 24
SAB NO CONDENSARE EN VAPOR	Vol %	-	0 120	0 2	0 2	0 32	0 32	0 32	0 2	0 2	0 8	0 8
COMPOSICION	Vol %											
CO ₂		-	87 20	92 8	95 9	95 9	95 9	95 9	87 0	87 0	93 4	93 4
H ₂ S		-	0 8	1 2	2 4	2 4	2 4	2 4	1 0	1 0	0 8	0 8
O ₂ , H ₂ , etc		-	0 0	0 0	0 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0
ANALISIS QUIMICOS DE AGUA CALIENTE												
PH		6 71	9 02	8 27	6 18	6 83	6 83	6 83	6 83	6 83	6 36	6 36
CONDUCTIVIDAD		0 28 x 10 ⁴	0 28 x 10 ⁴	0 46 x 10 ⁴	0 55 x 10 ⁴	0 42 x 10 ⁴	0 46 x 10 ⁴	0 46 x 10 ⁴				
SOLIDO TOTAL	PPM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaCO ₃		89 79	100 4	110 4	84 8	18 8	18 8	18 8	18 8	18 8	210 4	210 4
Ca		180 7 80	718 8	1920 2	1878 8	27 7	27 7	27 7	27 7	27 7	1644 4	1644 4
SO ₄		27 80	168 8	16 3	32 3	2 38	2 38	2 38	2 38	2 38	89 7	89 7
SiO ₂		214 0	940 0	244 0	427 3	0 6	0 6	0 6	0 6	0 6	323 0 7	323 0 7
Mg		821 8	370 1	887 2	1075 0	0 82	0 82	0 82	0 82	0 82	888 25	888 25
Cl		172 4	74 0	208 2	161 0	0 11	0 11	0 11	0 11	0 11	178 38	178 38
Ce		24 80	8 8	11 8	28 8	1 88	1 88	1 88	1 88	1 88	3 74	3 74
B		38 4	22 4	36 1	48 0	0 88	0 88	0 88	0 88	0 88	42 10	42 10
Mg++		0 33	0 08	0 12	0 18	0 18	0 18	0 18	0 18	0 18	0 81	0 81
Li+		8 88	3 3	7 80	9 88	0 81	0 81	0 81	0 81	0 81	7 27	7 27
Na		-	8 8	8 88	13 31	0 78	0 78	0 78	0 78	0 78	18 11	18 11

CUADRO No. 1

INDE - GUATEMALA
ESTUDIOS GEOTERMICOS

POZOS DE ZUNIL





EL CINTURON DE FOSAS alrededor de la cuenca central del Pacífico viene marcado en esta figura por las zonas trazadas con línea gruesa, estas representan los centros profundos de actividad sísmica. Los números indican: 1: Fosa de las Aleutianas. 2: Fosa de las Kuriles. 3: Fosa del Japón. 4: Fosa de Riu-Kiu. 5: Fosa de las Marianas. 6: Fosa de las Palaos. 7: Fosa de Filipinas. 8: Fosa de Wever. 9: Fosa de Java. 10: Fosa de Nueva Bretaña. 11: Fosa de Nuevas Hébridas. 12: Fosa de Tonga-Kermadec. 13: Fosa de Perú-Chile. 14: Fosa de Acapulco-Guatemala. 15: Fosa de Cedros.

FIG. No. 2

INDE - GUATEMALA.
ESTUDIOS GEOTERMICOS
ANILLO CIRCUMPACIFICO Y FOSAS.

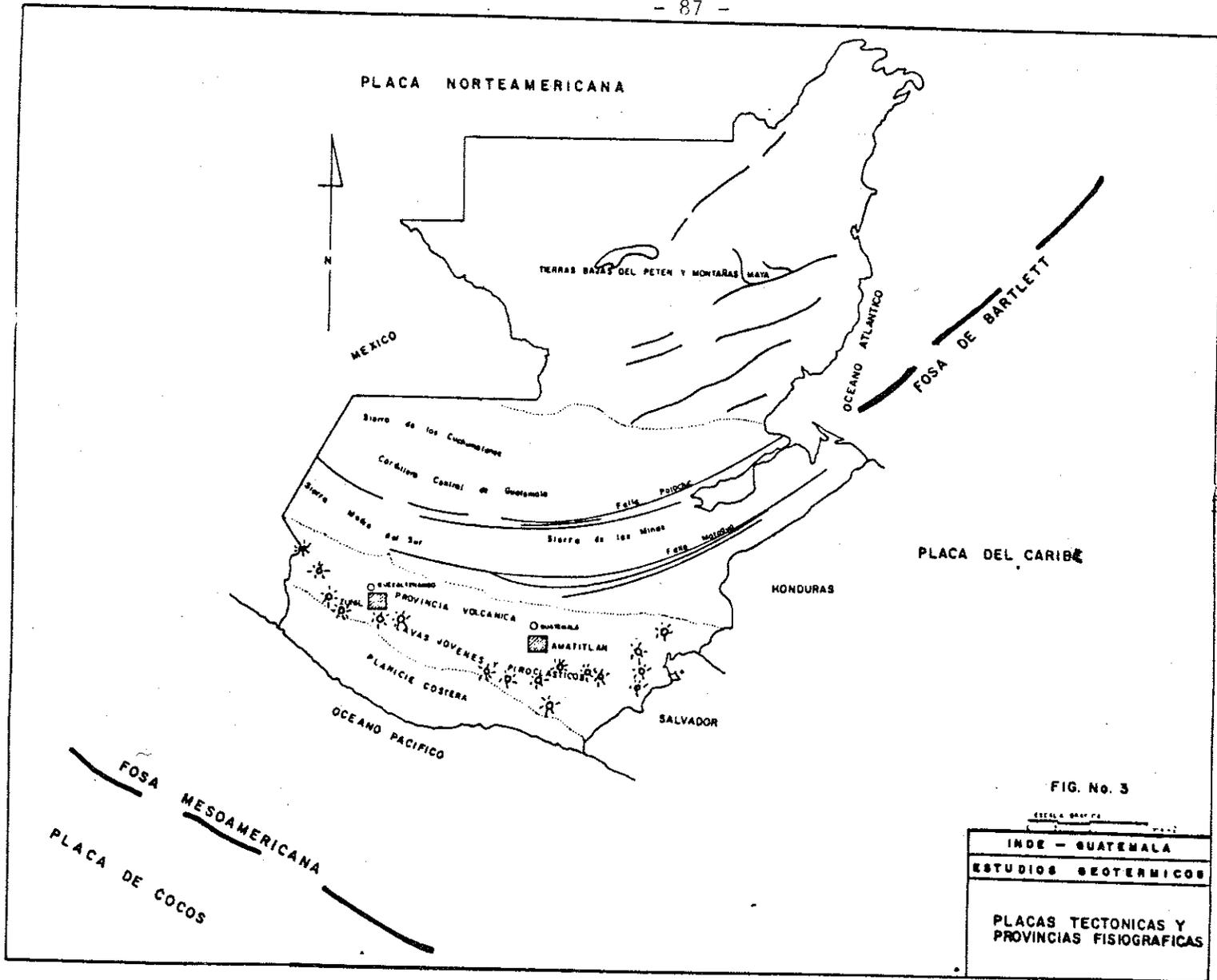


FIG. No. 3

AREAS GEOTERMICAS DE GUATEMALA

TEMPERATURAS PROBABLES EN PROFUNDIDAD. QUIMICA DE LAS ZONAS GEOTERMALES

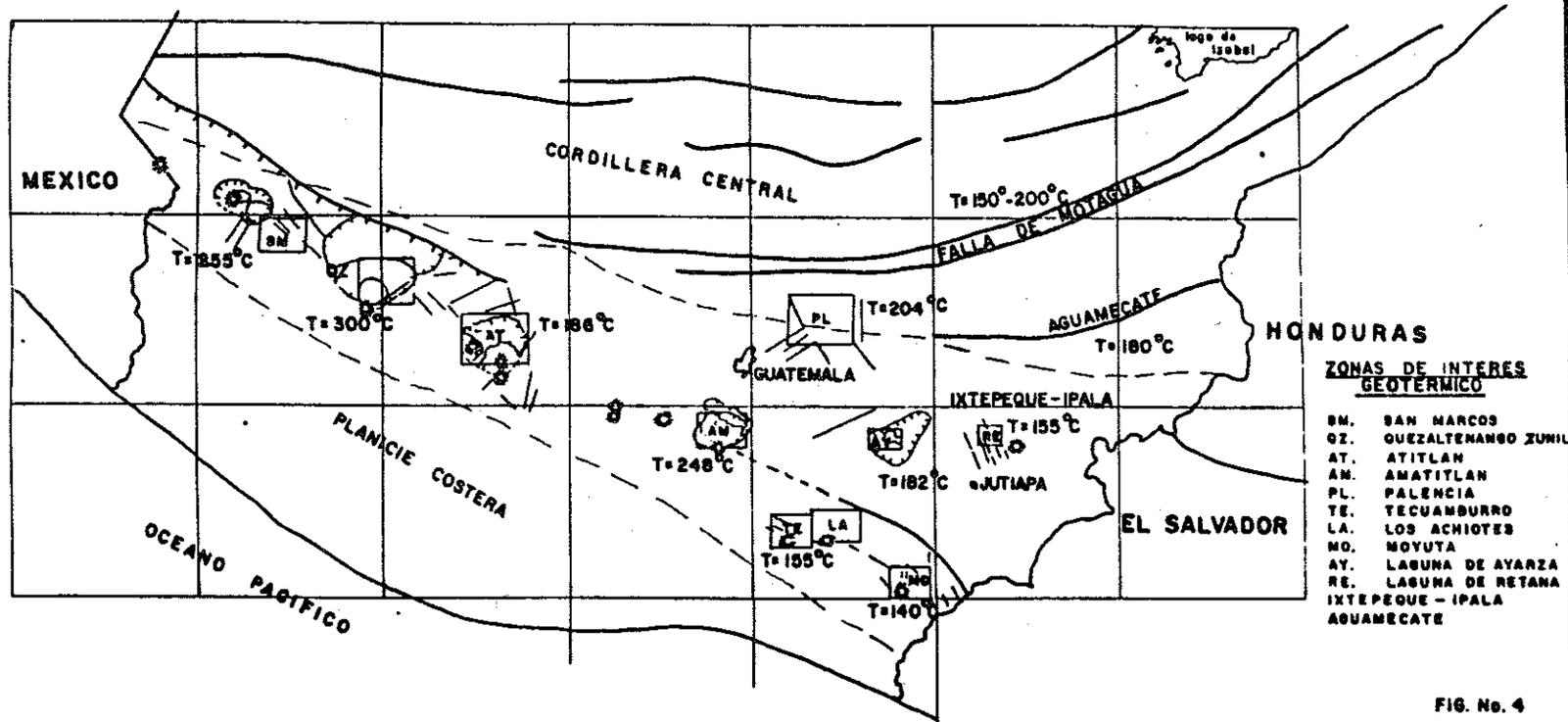
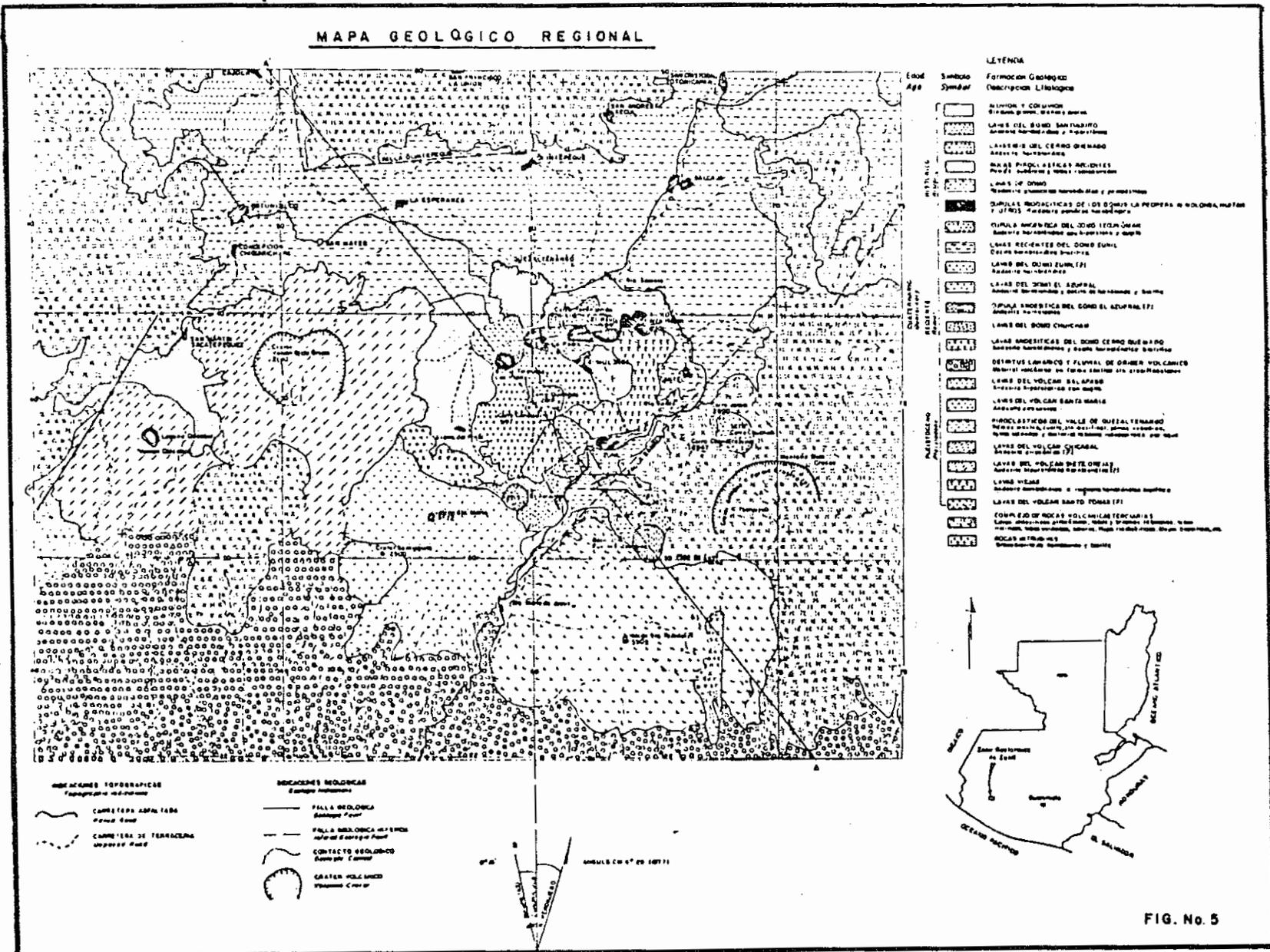
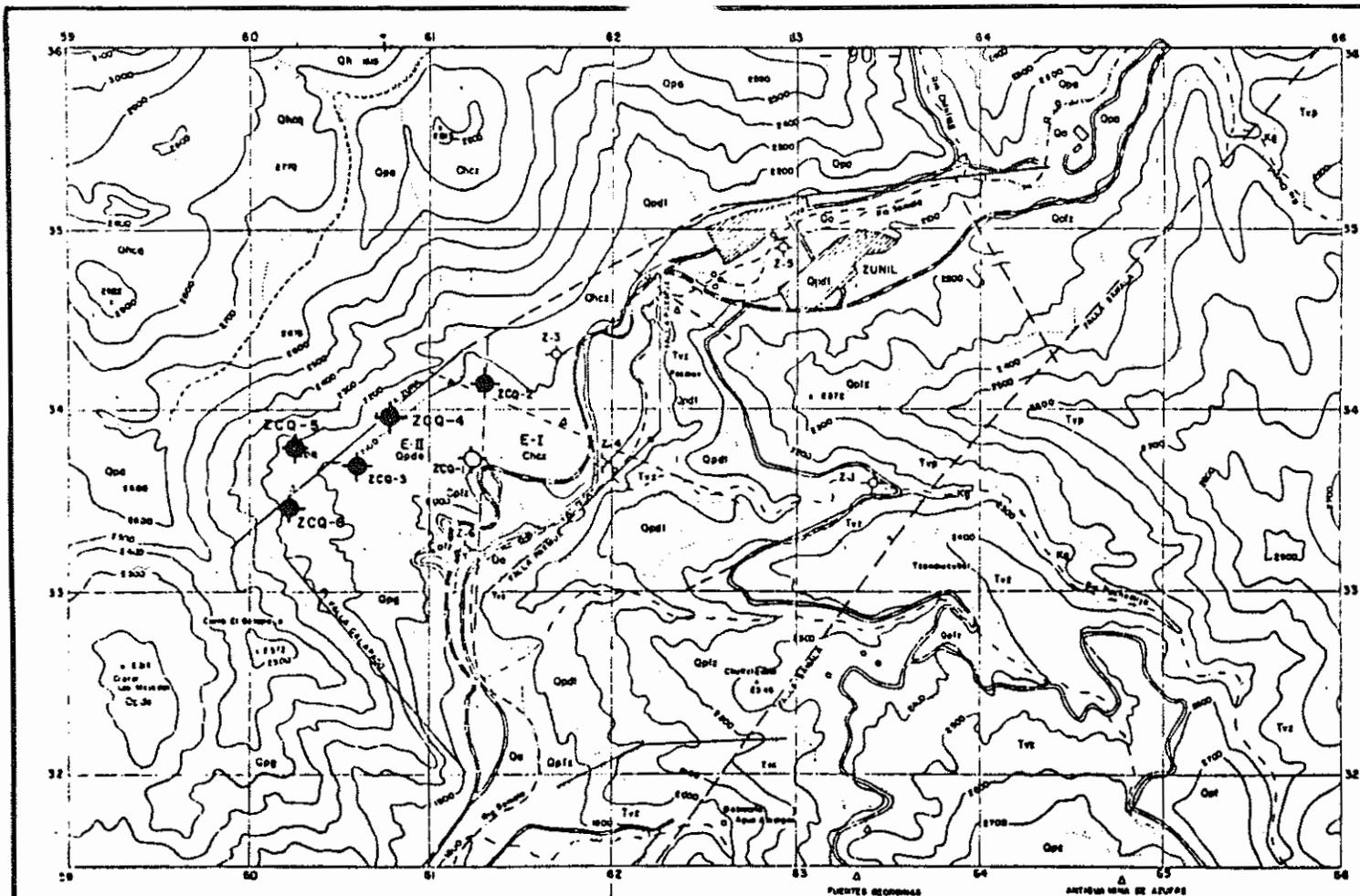


FIG. No. 4

Area Geotérmica	Temp. Probable Profunda °C	PH	MILI - MOLES / LITRO											
			Na	K	Ca	Mg	Li	As	B	SiO ₂	Cl	SO ₄	HCO ₃	
SM	224	8.6	23.4	1.97	0.115	—	1.22	—	—	—	8.85	20.6	1.76	0.590
QZ	300	6.32	1.68	0.302	0.989	1.05	0.0101	—	0.0074	5.47	0.6	01.89	3.18	
AT	186	6.91	10.4	0.467	2.73	0.292	0.146	0.00294	0.812	1.96	6.06	3.51	5.42	
AM	248	7.22	12.6	1.50	1.27	1.65	0.0662	—	0.260	3.49	7.90	0.222	11.0	
PL	204	6.29	10.6	0.649	1.81	0.216	1.20	0.000934	0.226	1.27	1.16	1.19	12.4	
IXTEPEQUE, IPALA	155	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
YE-LA	155	7.48	27.1	0.664	1.55	0.0802	0.269	0.0244	1.47	1.63	22.7	1.91	2.08	
MO	140	6.80	27.9	0.793	3.67	0.0494	—	—	1.87	—	39.6	1.92	2.61	
AY	162	7.22	2.20	0.111	4.77	2.38	—	—	0.00004	0.00025	0.849	1.41	7.34	2.68
RE	155	7.50	13.20	0.108	0.136	0.00846	0.0288	0.00174	0.0614	0.816	1.83	0.990	10.8	
AGUAMECATE	180	6.06	6.39	0.389	6.29	2.53	0.102	0.000634	0.334	0.888	1.18	1.15	1.35	

MAPA GEOLÓGICO REGIONAL



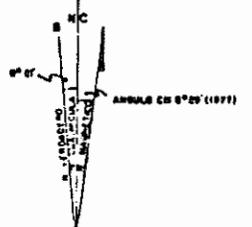


LEYENDA

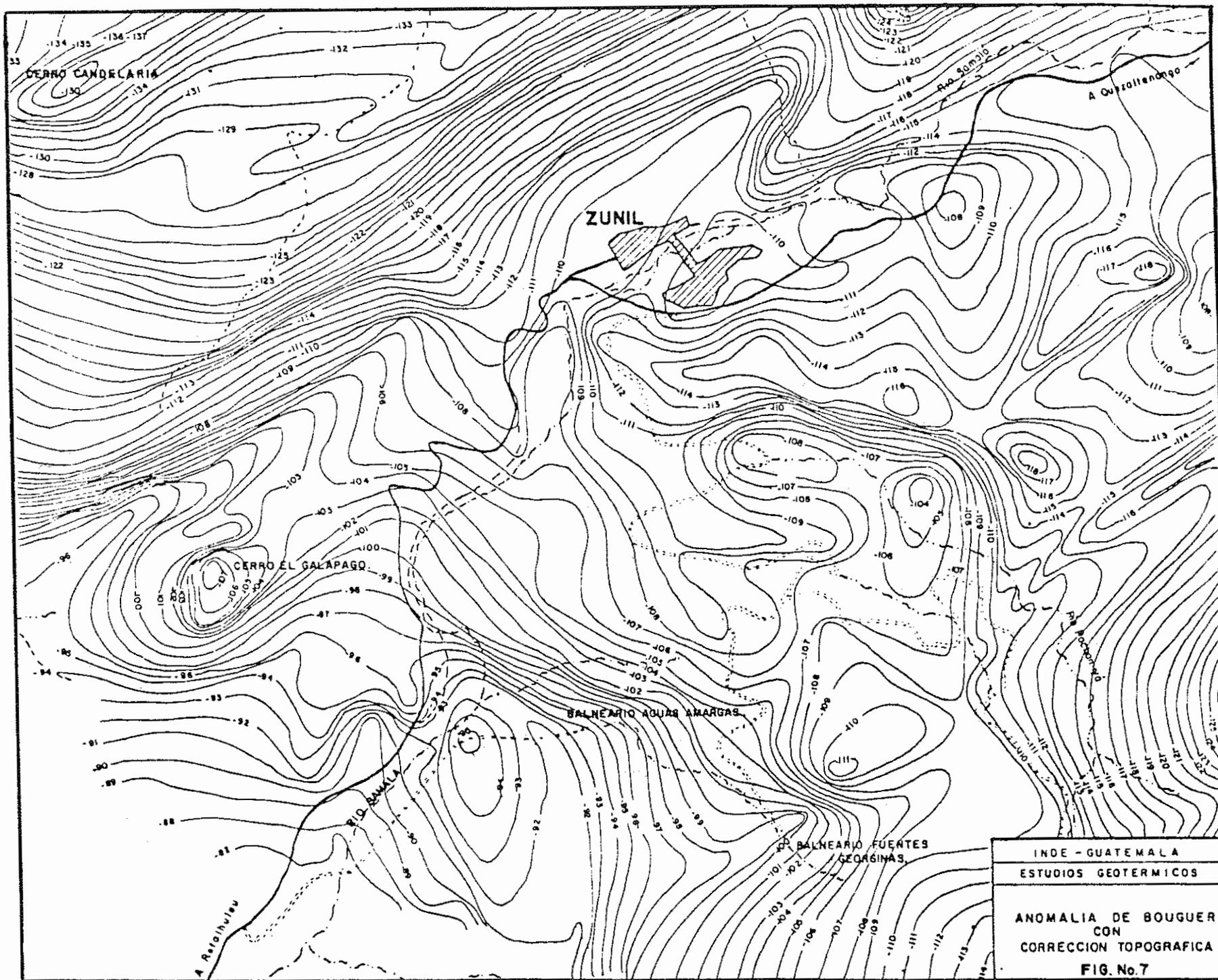
UNIDAD GEOLOGICA	Simbolo	Nombre	Formacion
Qp1	[Symbol]	Qp1	Qp1
Qp2	[Symbol]	Qp2	Qp2
Qp3	[Symbol]	Qp3	Qp3
Qp4	[Symbol]	Qp4	Qp4
Qp5	[Symbol]	Qp5	Qp5
Qp6	[Symbol]	Qp6	Qp6
Qp7	[Symbol]	Qp7	Qp7
Qp8	[Symbol]	Qp8	Qp8
Qp9	[Symbol]	Qp9	Qp9
Qp10	[Symbol]	Qp10	Qp10
Qp11	[Symbol]	Qp11	Qp11
Qp12	[Symbol]	Qp12	Qp12
Qp13	[Symbol]	Qp13	Qp13
Qp14	[Symbol]	Qp14	Qp14
Qp15	[Symbol]	Qp15	Qp15
Qp16	[Symbol]	Qp16	Qp16
Qp17	[Symbol]	Qp17	Qp17
Qp18	[Symbol]	Qp18	Qp18
Qp19	[Symbol]	Qp19	Qp19
Qp20	[Symbol]	Qp20	Qp20
Qp21	[Symbol]	Qp21	Qp21
Qp22	[Symbol]	Qp22	Qp22
Qp23	[Symbol]	Qp23	Qp23
Qp24	[Symbol]	Qp24	Qp24
Qp25	[Symbol]	Qp25	Qp25
Qp26	[Symbol]	Qp26	Qp26
Qp27	[Symbol]	Qp27	Qp27
Qp28	[Symbol]	Qp28	Qp28
Qp29	[Symbol]	Qp29	Qp29
Qp30	[Symbol]	Qp30	Qp30
Qp31	[Symbol]	Qp31	Qp31
Qp32	[Symbol]	Qp32	Qp32
Qp33	[Symbol]	Qp33	Qp33
Qp34	[Symbol]	Qp34	Qp34
Qp35	[Symbol]	Qp35	Qp35
Qp36	[Symbol]	Qp36	Qp36
Qp37	[Symbol]	Qp37	Qp37
Qp38	[Symbol]	Qp38	Qp38
Qp39	[Symbol]	Qp39	Qp39
Qp40	[Symbol]	Qp40	Qp40
Qp41	[Symbol]	Qp41	Qp41
Qp42	[Symbol]	Qp42	Qp42
Qp43	[Symbol]	Qp43	Qp43
Qp44	[Symbol]	Qp44	Qp44
Qp45	[Symbol]	Qp45	Qp45
Qp46	[Symbol]	Qp46	Qp46
Qp47	[Symbol]	Qp47	Qp47
Qp48	[Symbol]	Qp48	Qp48
Qp49	[Symbol]	Qp49	Qp49
Qp50	[Symbol]	Qp50	Qp50
Qp51	[Symbol]	Qp51	Qp51
Qp52	[Symbol]	Qp52	Qp52
Qp53	[Symbol]	Qp53	Qp53
Qp54	[Symbol]	Qp54	Qp54
Qp55	[Symbol]	Qp55	Qp55
Qp56	[Symbol]	Qp56	Qp56
Qp57	[Symbol]	Qp57	Qp57
Qp58	[Symbol]	Qp58	Qp58
Qp59	[Symbol]	Qp59	Qp59
Qp60	[Symbol]	Qp60	Qp60
Qp61	[Symbol]	Qp61	Qp61
Qp62	[Symbol]	Qp62	Qp62
Qp63	[Symbol]	Qp63	Qp63
Qp64	[Symbol]	Qp64	Qp64
Qp65	[Symbol]	Qp65	Qp65
Qp66	[Symbol]	Qp66	Qp66
Qp67	[Symbol]	Qp67	Qp67
Qp68	[Symbol]	Qp68	Qp68
Qp69	[Symbol]	Qp69	Qp69
Qp70	[Symbol]	Qp70	Qp70
Qp71	[Symbol]	Qp71	Qp71
Qp72	[Symbol]	Qp72	Qp72
Qp73	[Symbol]	Qp73	Qp73
Qp74	[Symbol]	Qp74	Qp74
Qp75	[Symbol]	Qp75	Qp75
Qp76	[Symbol]	Qp76	Qp76
Qp77	[Symbol]	Qp77	Qp77
Qp78	[Symbol]	Qp78	Qp78
Qp79	[Symbol]	Qp79	Qp79
Qp80	[Symbol]	Qp80	Qp80
Qp81	[Symbol]	Qp81	Qp81
Qp82	[Symbol]	Qp82	Qp82
Qp83	[Symbol]	Qp83	Qp83
Qp84	[Symbol]	Qp84	Qp84
Qp85	[Symbol]	Qp85	Qp85
Qp86	[Symbol]	Qp86	Qp86
Qp87	[Symbol]	Qp87	Qp87
Qp88	[Symbol]	Qp88	Qp88
Qp89	[Symbol]	Qp89	Qp89
Qp90	[Symbol]	Qp90	Qp90
Qp91	[Symbol]	Qp91	Qp91
Qp92	[Symbol]	Qp92	Qp92
Qp93	[Symbol]	Qp93	Qp93
Qp94	[Symbol]	Qp94	Qp94
Qp95	[Symbol]	Qp95	Qp95
Qp96	[Symbol]	Qp96	Qp96
Qp97	[Symbol]	Qp97	Qp97
Qp98	[Symbol]	Qp98	Qp98
Qp99	[Symbol]	Qp99	Qp99
Qp100	[Symbol]	Qp100	Qp100

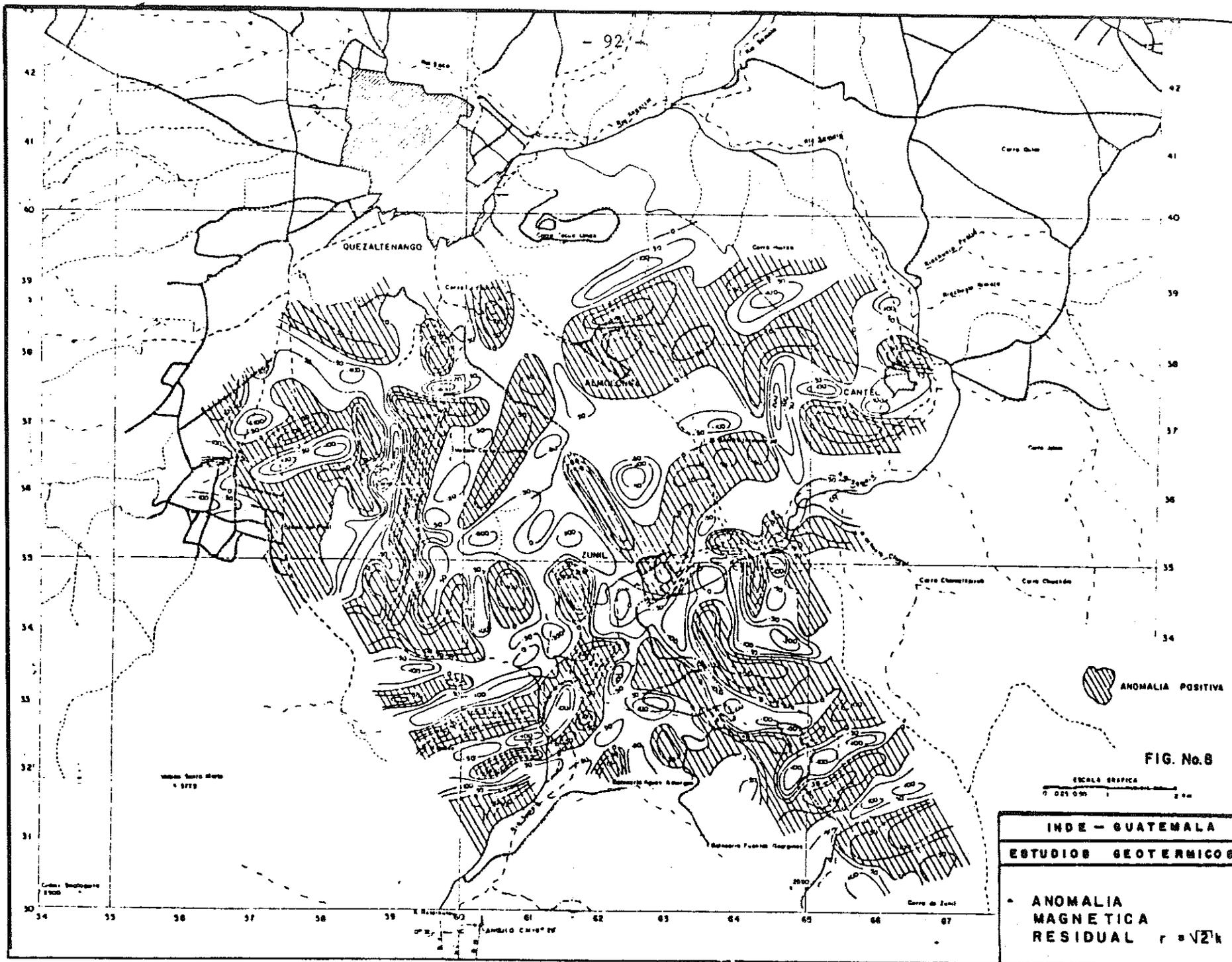
- FALTA DE DOLICITA
- FRACTURA PROBABLE
- FRACTURA
- ELIMINADO DE DOLICITA
- △ FUMIGACION
- MANANTIAL CALIENTE
- POZO EXPLORATORIO DE DIAMETRO PEQUEÑO
- POZO EXPLORATORIO DE DIAMETRO GRANDE
- POZO EXPLORATORIO DE DIAMETRO MEDIANO
- POZO EXPLORATORIO DE DIAMETRO GRANDE

FIG. No. 6



INDE - GUATEMALA
ESTUDIOS GEOTERMICOS
MAPA GEOLOGICO





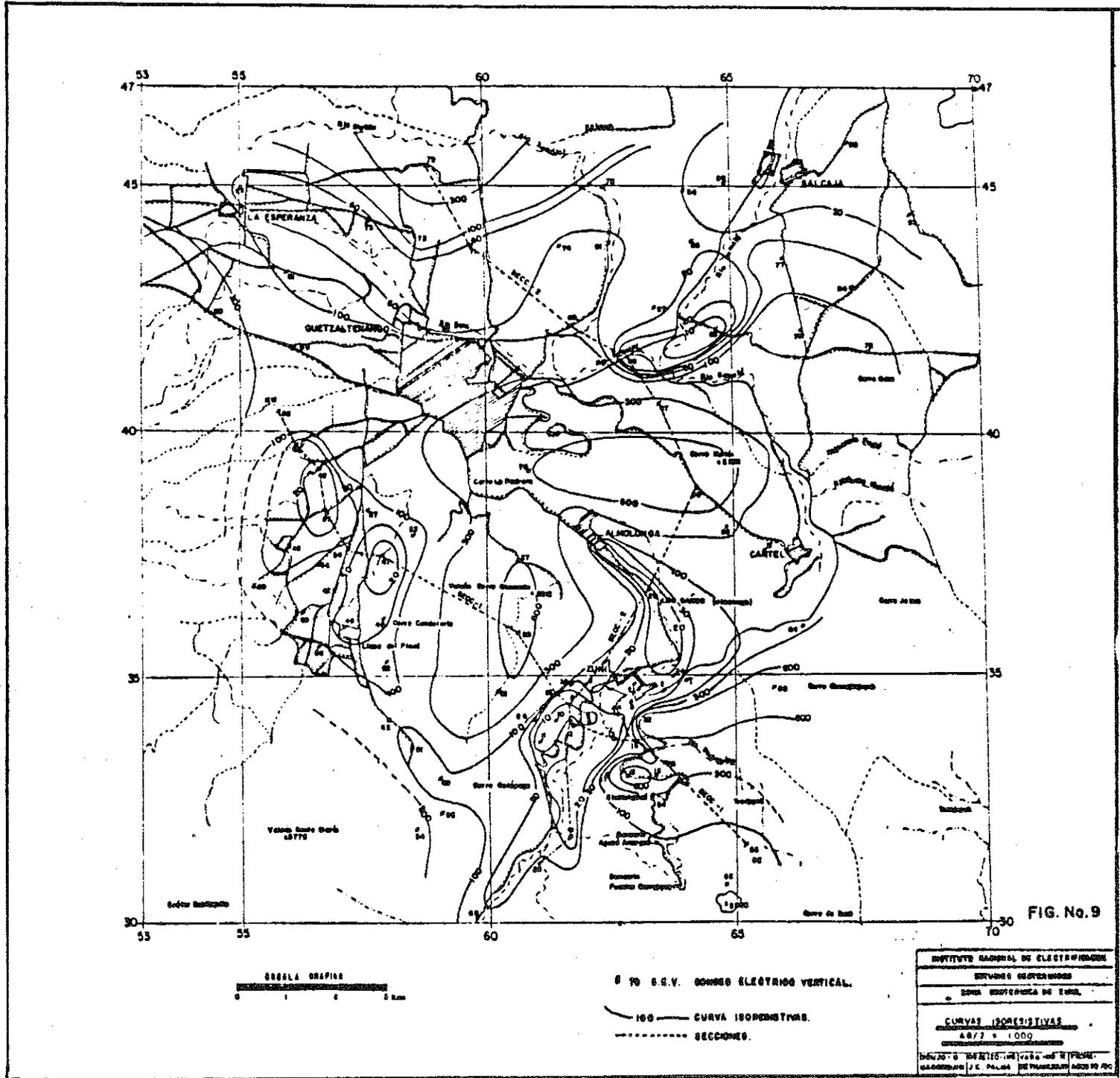


FIG. No. 9

SECCION ESTRATIGRAFICA
POZO Z.C.Q.-3

PROGRAMA DE PERFORACION
Y
PERFIL
DEL ARMADO DEL POZO

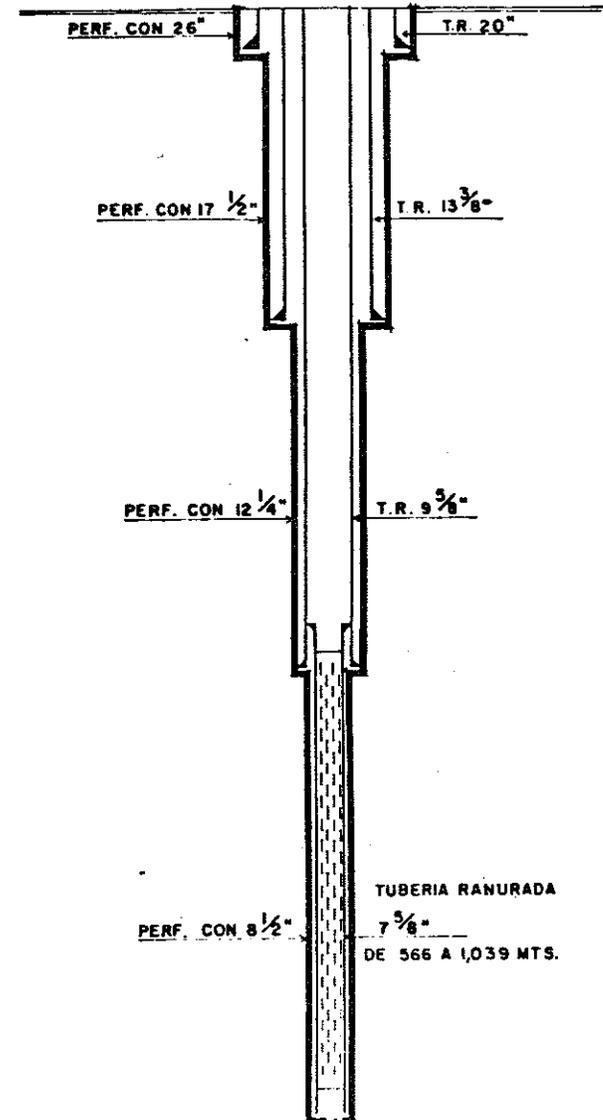
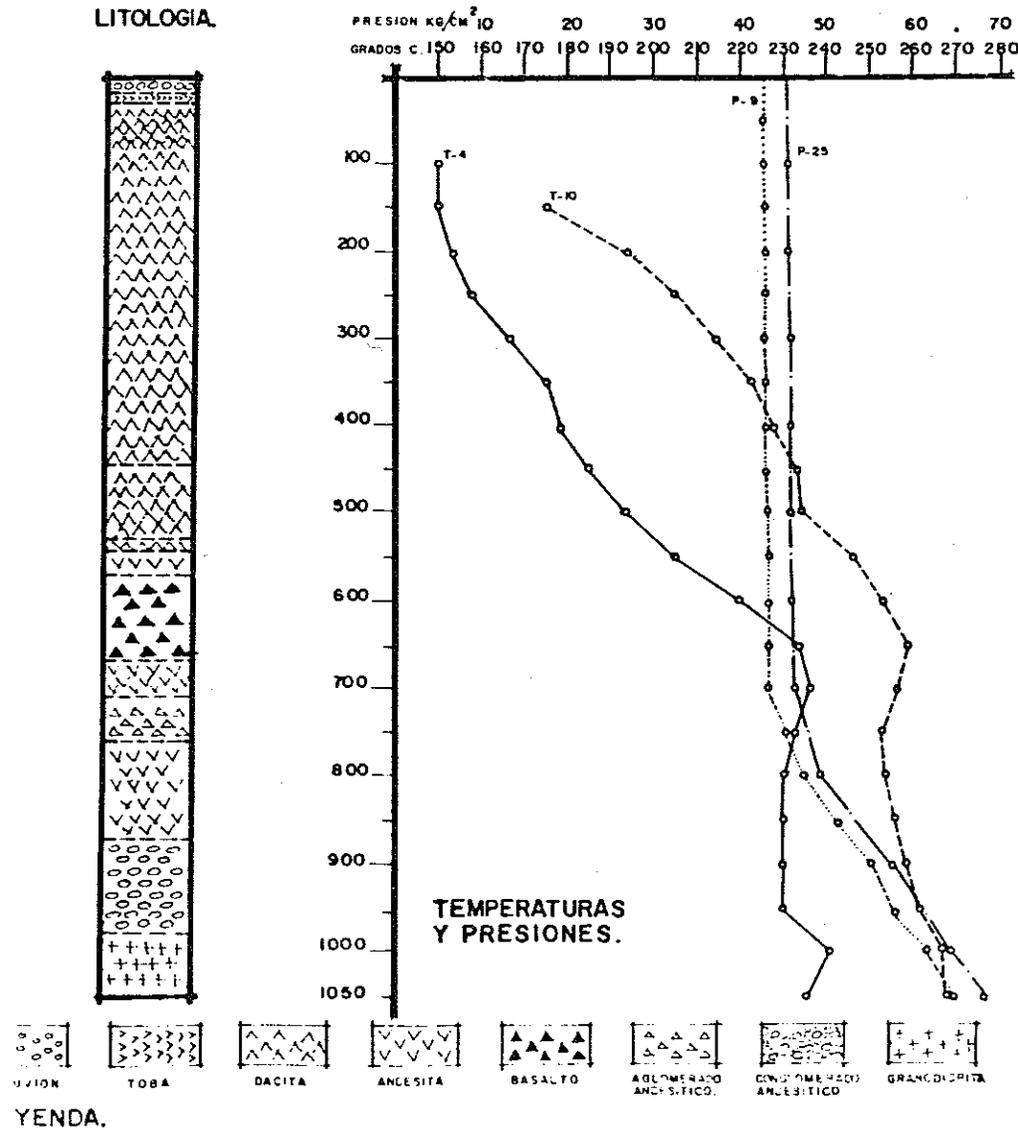


FIG. No II

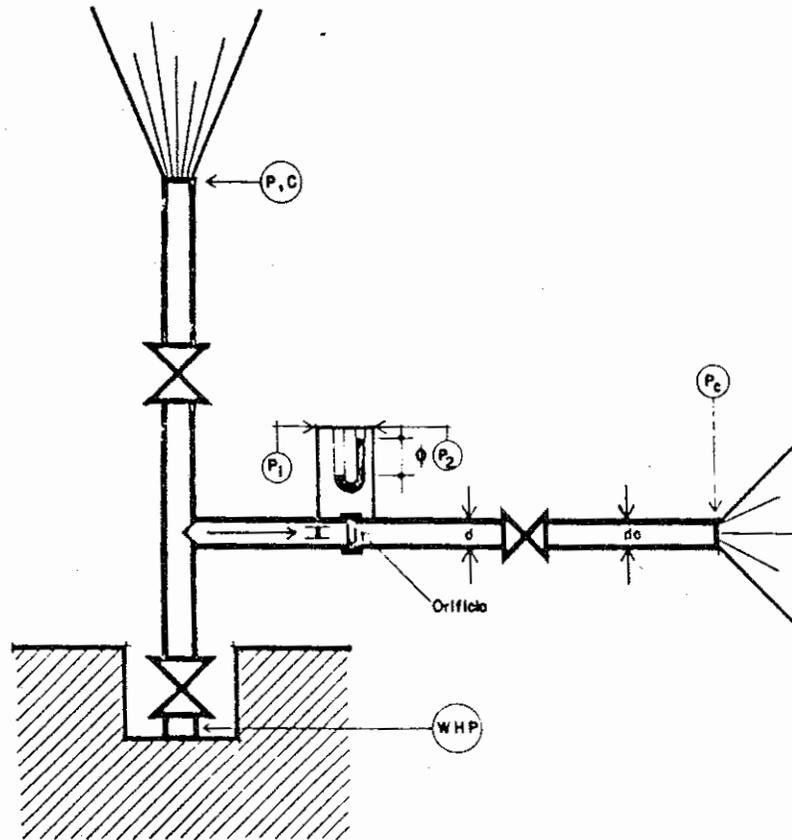


FIG. No. 12

INDE - GUATEMALA
ESTUDIOS GEOTERMICOS
GRAFICA PARA APRECIAR EL PROCESO DE EVALUACION DE POZOS GEOTERMICOS.

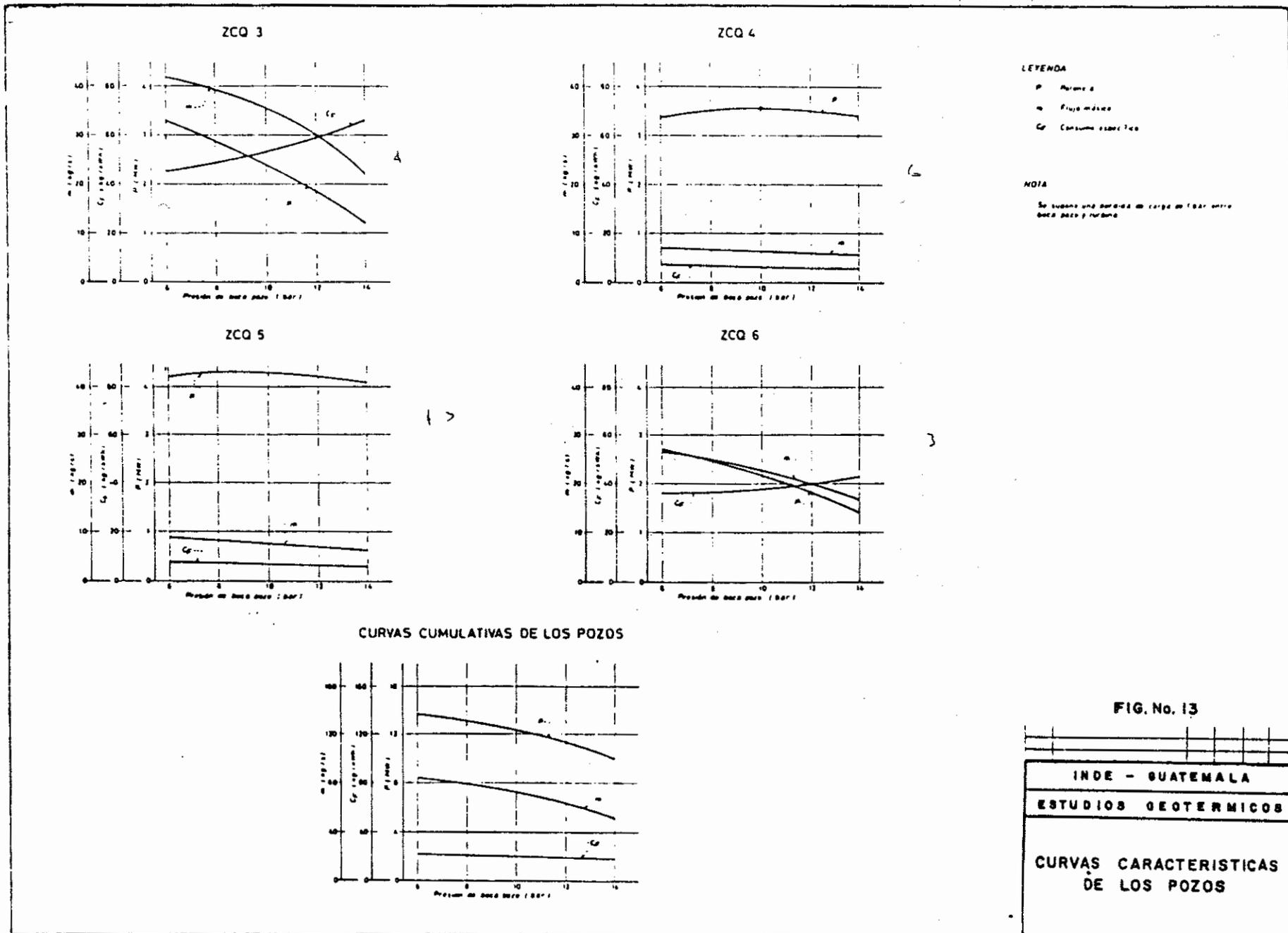
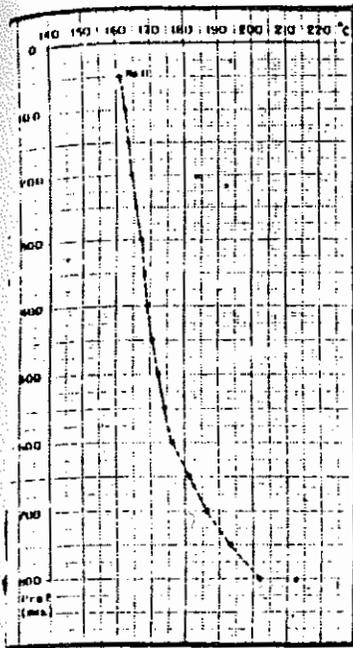


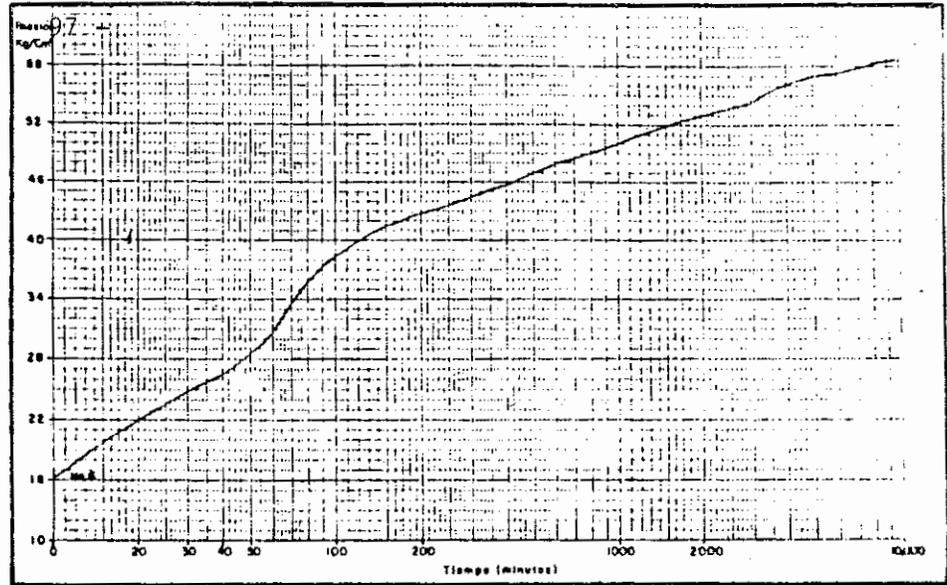
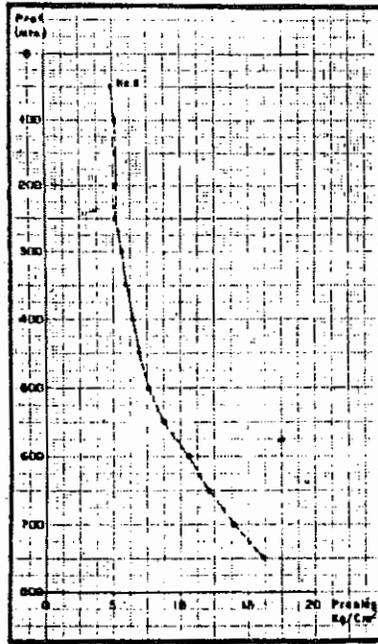
FIG. No. 13

INDE - GUATEMALA
ESTUDIOS GEOTERMICOS
CURVAS CARACTERISTICAS DE LOS POZOS

DINAMICO



DINAMICO



CAUDAL Y ENTALPIA

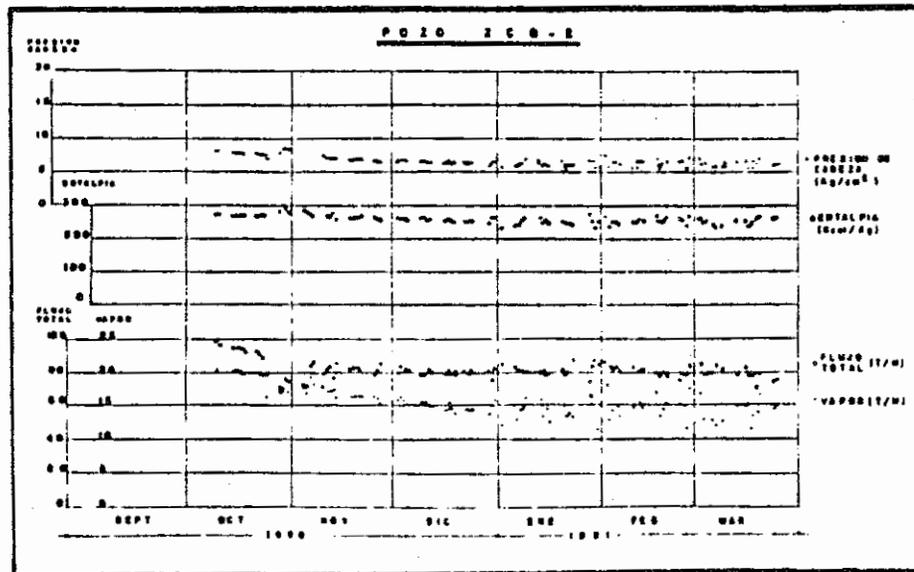
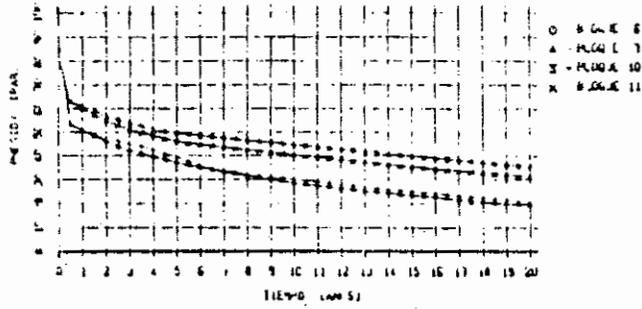


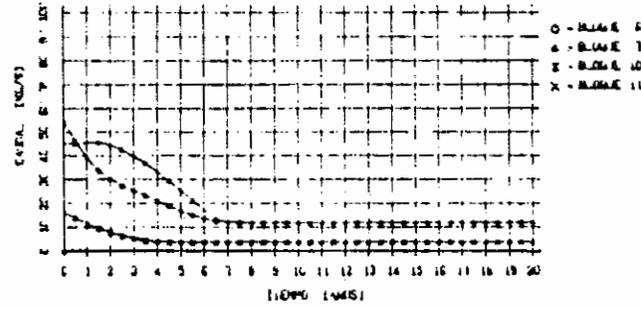
FIG. No. 14

INDE - GUATEMALA
 ESTUDIOS GEOTERMICOS
 PRUEBAS EN EL POZO
 Z.C.Q.-2

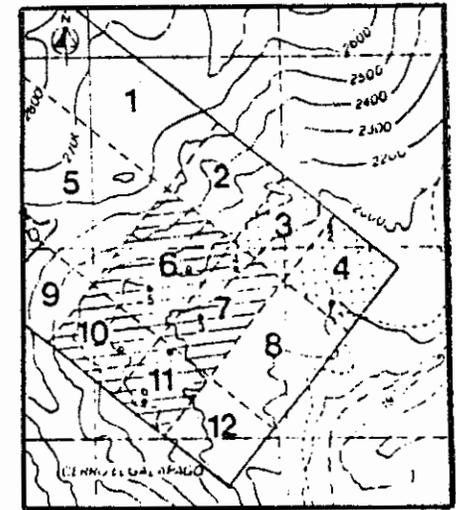
PRESION EN LOS BLOQUES DE EXTRACCION



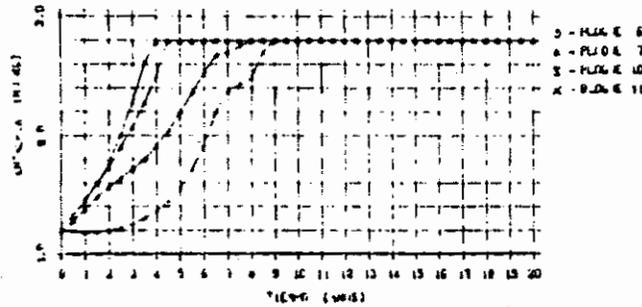
CAUDAL EXTRAIDO



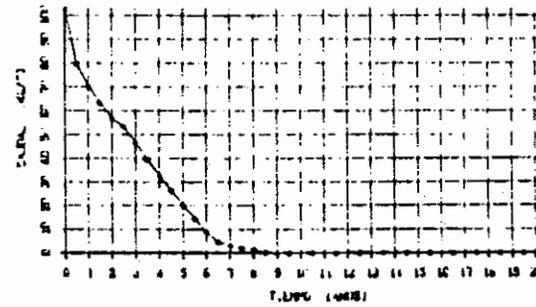
MAPA DE LOCALIZACION



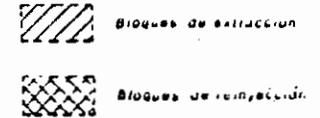
ENTALPIA DEL FLUIDO EXTRAIDO



CAUDAL REINYECTADO



LEYENDA



MASA ACUMULADA

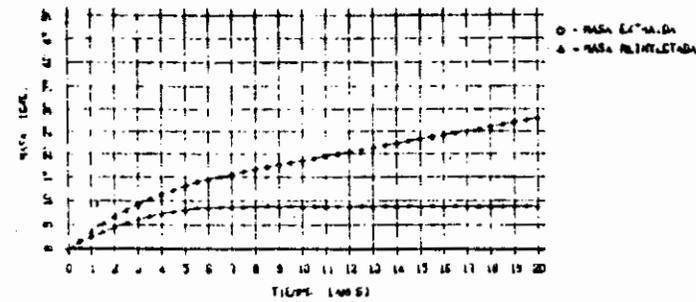
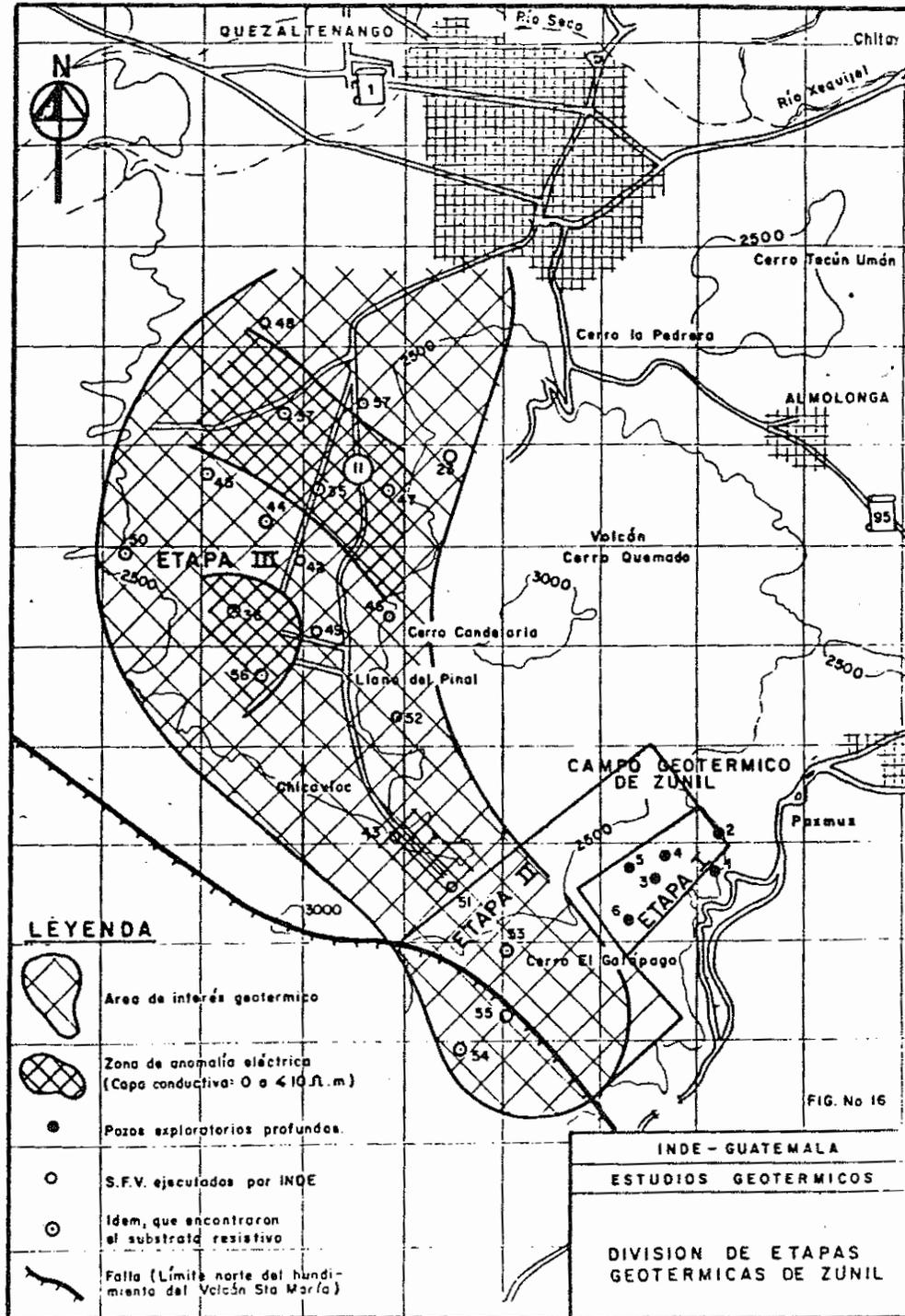


FIG. No. 15

INQE - GUATEMALA
ESTUDIOS GEOTERMICOS
SIMULACION CON ACUIFERO REINYECTADO



2.9 LA GEOTERMIA EN HAITI

DEPARTAMENTO DE
MINAS Y RECURSOS
ENERGETICOS

1. CRONOLOGIA DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Los primeros trabajos sobre la geotermia en Haití fueron realizados durante la segunda mitad del año 1977, por el Instituto Nacional de Recursos Mineros (INAREM) que, un año más tarde, se convirtió en el Departamento de Minas y Recursos Energéticos.

En noviembre de 1977, la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), realizó una misión de reconocimiento geotérmico a Haití, la cual inspeccionó la mayoría de fuentes termales y señaló las zonas de interés geotérmico. En 1978, en base al criterio aportado por la anterior misión, OLADE celebró con el gobierno de Haití un convenio de asistencia técnica, para desarrollar en el país la etapa de reconocimiento del proyecto de exploración y desarrollo de los recursos geotérmicos de la nación.

A principios de noviembre de 1979, se realizó en Port-au-Prince una evaluación de los primeros resultados de los trabajos de reconocimiento de la primera fase del Proyecto de Exploración Geotérmica, en la cual intervinieron los representantes del Departamento de Minas y Recursos Energéticos, expertos internacionales, así como geólogos y geoquímicos del BRGM que participaron por parte de OLADE en la ejecución del proyecto.

Como resultado final del reconocimiento se seleccionaron en orden de prioridades las áreas geotérmicas siguientes: Los pozos, Cul de Sac (Sources Puantes), Sources Chaudes o Eaux Boynes, y Jérémie.

Del 11 al 13 de febrero de 1981, un grupo de trabajo dirigido por OLADE y compuesto por una decena de expertos internacionales y técnicos haitianos, se reunió en la Sala de Conferencias del Departamento de Minas y Recursos Energéticos en Port-au-Prince, a fin de evaluar las posibilidades de explotación de los recursos geotérmicos de baja y mediana entalpía y elaborar el esquema de desarrollo de un proyecto tipo.

Hacia fines de enero de 1983, el Estado Haitiano y OLADE firmaron un nuevo convenio de cooperación, para la ejecución de la segunda fase del Proyecto de Exploración Geotérmica, la cual incluía los siguientes trabajos: Desarrollo de la etapa de Prefactibilidad de los recursos de baja y media entalpía de 2 áreas prioritarias seleccionadas en el Reconocimiento y elaboración de un proyecto tipo.

Es interesante indicar que la ejecución de la segunda fase prácticamente ya se ha iniciado, puesto que a principios de junio recibimos en Port-au-Prince, una primera misión del BRGM, organismo ejecutor por parte de OLADE, la cual permaneció en el país unos quince días. Esta misión se puso en contacto con los organismos nacionales interesados en el proyecto, efectuó excursiones de campo, estableció un cronograma de ejecución y preparó, en forma preliminar, el trabajo de la segunda misión que llegó a principios de agosto último. Se examinaron los datos disponibles, se visitaron los sitios en los cuales surgen las aguas termales, así como su medio ambiente; se determinaron los métodos que pueden ser desarrollados en el campo y se identificaron los eventuales centros de consumo.

2. ESTADO ACTUAL DE LAS INVESTIGACIONES

Las "Sources Puantes"

Las "Sources Puantes" se encuentran en el extremo noroeste de la Planicie del Cul de Sac. Están separadas del mar por un pantano de manglares. El agua desprende un fuerte olor de H_2S , que, a veces puede percibirse a distancia.

Su temperatura es de aproximadamente $32.7^{\circ}C$ (WOODRING, 1924), su caudal es de 120 l/min (BRGM, OLADE, 1979) y su pH es de 6.52.

Las Fuentes Termales de Gonaives (Eaux Boynes)

Estas fuentes termales también se conocen como "Eaux Boynes". Se encuentran treinta kilómetros al noroeste de Gonaives, cerca de la costa. Estas aguas termales surgen en varios sitios; su temperatura puede evaluarse globalmente en $50^{\circ}C$, su caudal es de 80 l/min y su pH es 7,09.

Las Fuentes Termales de Los Pozos

El sector de Los Pozos está en la Planicie Central (Plateau Central"), aproximadamente 5 ó 6 km al Suroeste de Cerce La Source, próximo a la frontera con la República Dominicana. Esta región forma parte de la vertiente norte de la Cordillera Paincroix que separa las zonas de Thomassique y de Cerce-La-Source. Esta cordillera, que sigue aproximadamente una dirección NW - SE, parece atravesar toda la Planicie Central y prolongarse hacia el Sureste en la República Dominicana.

Tal como las anteriores, las Fuentes termales de Los Pozos surgen en varios sitios. Su temperatura oscila entre 36 y $42^{\circ}C$; su caudal y su pH no han sido determinados.

Los geotermómetros indican temperaturas promedio del orden de $120-130^{\circ}C$.

Las Fuentes Termales de Jérémie

Estas se encuentran en la parte occidental de la Península del Sur ("Presqu'île du Sud") y surgen en dos puntos.

Las temperaturas registradas son de 40 y $45^{\circ}C$, respectivamente. Su caudal es de 30 l/min y su pH de 9,58.

En base a los estudios realizados a la fecha se deduce que el país solamente puede contar con recursos geotérmicos de mediana y baja entalpía. En efecto, ninguna de las zonas de interés seleccionadas durante el estudio, indican la presencia de campos geotérmicos de alta entalpía, ya que no se pudo establecer ninguna relación entre el termalismo y el volcanismo reciente. No obstante, el graben del "Cul de Sac", donde están ubicadas las "Sources Puantes", fue considerado al principio, como la única zona de interés geotérmico con un potencial eventual de alta energía.

El Graben del "Cul de Sac"

Esta estructura tectónica predominante en la Isla de Española, se extiende desde el Graben del "Cul de Sac" hasta el Graben de Enriquillo en la República Dominicana y continúa en el mar. El largo del graben en su parte emergida es de 130 km y su anchura promedio es de 20 km.

Aquí se encuentran calizas macizas, fracturadas en la época del Mioceno, las cuales podrían constituir un acuífero geotérmico potencial. En esta formación existe una secuencia impermeable de gran potencia, de la época del Mioceno, constituida por sedimentos del tipo "flysch" y sedimentos detríticos continentales. El Graben está delimitado por fallas normales, cuyo desplazamiento vertical llega a 1500 m, particularmente en el flanco sur.

Las "Sources Puantes", como las demás manifestaciones termales y volcánicas de la isla, están situadas en la intersección del sistema de fallas principales de rumbo WNW - ESE y el sistema transversal NE-SW.

Los geotermómetros Na/K y Na/K/Ca indican para estas aguas termales temperaturas de fondo de 160 - 165°C. No obstante, es evidente que se trata de agua de mar diluida, por lo tanto estos valores no se consideran válidos. La temperatura de fondo más confiable es la del geotermómetro de sílice, que indicó una temperatura de 70°C.

"Sources Chaudes (Manantiales Calientes) o Eaux Boynes"

Esta región no tiene indicios volcánicos. Aquí se encuentran cinco (5) puntos de salida alineados en dirección N110 - N120. Las aguas termales emergen de calizas eocenas milonitizadas que constituyen el acuífero. La geoquímica indica temperaturas de fondo bajas (46° a 52°C), las cuales tienen la misma magnitud que las aguas emergentes.

Manantiales Calientes de Los Pozos

Las relaciones entre estas aguas termales y los pliegues post-Miocenos, fueron claramente puestos en evidencia mediante los estudios de campo. Todas las aguas provenientes del mismo acuífero.

El geotermómetro de sílice indica bajas temperaturas. Sin embargo, los geotermómetros Na/K y Na/K/Ca registran temperaturas promedio del orden de 120 a 130°C. De ser consistentes estos geotermómetros con la temperatura real de fondo, esta área sería favorable para explotación de energía de media entalpía.

3. RECURSOS HUMANOS DISPONIBLES

Haití no cuenta con muchos expertos en geotermia, pero se aprovechará la ejecución de la Segunda Fase de los trabajos de exploración para capacitar personal profesional mediante la transferencia de tecnología que prevé el contrato firmado por el BRGM con OLADE para la ejecución de dicha fase.

El personal que el Departamento Minas y Recursos Energéticos tiene destacado al Proyecto Geotérmico es el siguiente:

- Ingeniero Geotérmico, encargado de las actividades y de la coordinación del Proyecto.
- 2 Ingenieros
- 4 Técnicos
- 2 Choferes

4. PRONOSTICO PARA LOS PROXIMOS CINCO AÑOS

1. Explotación de aguas termales con fines industriales y terapéuticos.
2. Instalación de micro-centrales eléctricas que funcionen con base en el ciclo binario RANKINE, en las regiones con recursos disponibles, a fin de suministrar energía eléctrica a la población rural;
3. Creación de pequeñas zonas de desarrollo; y
4. Continuación de los trabajos de investigación y promoción del aprovechamiento industrial de las aguas termales.

5. PERSPECTIVAS DEL RECURSO - INCIDENCIA DENTRO DEL SECTOR DE LA ENERGIA DEL PAIS

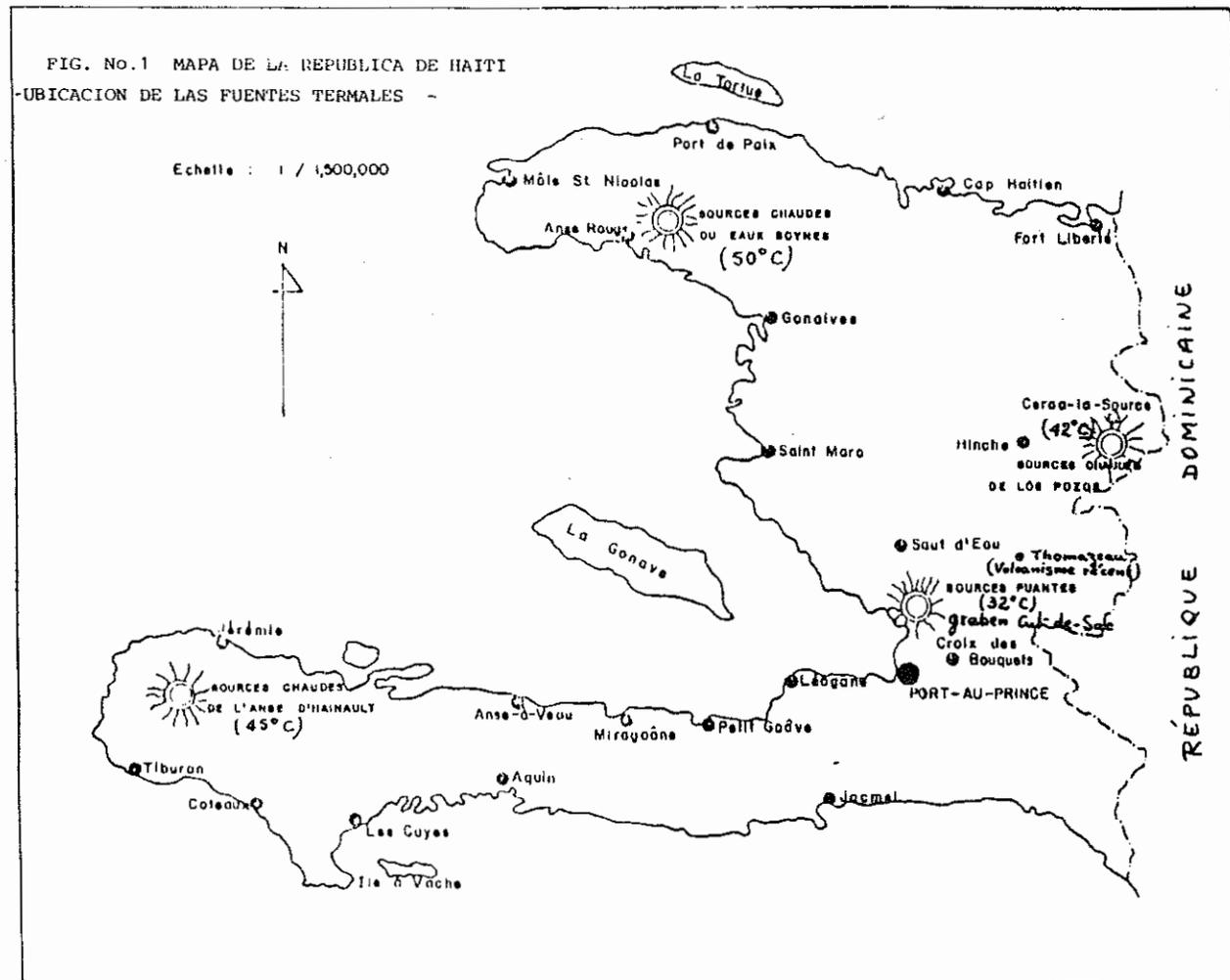
Haití depende del exterior para satisfacer gran parte de sus necesidades energéticas. Por otra parte la población rural utiliza la leña o el carbón vegetal casi en un cien por ciento para suplir sus necesidades energéticas, lo cual está ocasionando un desastre ecológico de gran magnitud; por lo tanto, cualquier aprovechamiento geotérmico que pueda reducir esta dependencia energética y/o disminuir la tala intempestiva de los bosques, sería de gran interés.

Por lo tanto, conviene iniciar el estudio de un inventario de las necesidades energéticas de baja y mediana entalpía, en vista de que los recursos geotérmicos en este campo son seguros. Este inventario se realizará con un doble criterio: un criterio sectorial, por tipos de utilización, el cual requiere un inventario de los actuales y potenciales usuarios, y un criterio geográfico que permita establecer una cartografía de la demanda energética y que, debe ser compatible con la cartografía de los recursos.

Ya que la utilización más espectacular de los recursos geotérmicos es su conversión en energía eléctrica mediante turbinas de vapor, sería deseable que las investigaciones se realicen con especial cuidado en Los Pozos y en el Graben del "Cul de Sac", a fin de revelar los recursos de baja y mediana energía y, eventualmente, de proponerse otros objetivos más ambiciosos, tales como la alta energía precisamente en el Graben

del "Cul de Sac" que se ha considerado como la única esperanza posible en alta energía para Haití. (Varet, 1979).

Debemos esperar que la ejecución de la Segunda Fase del Proyecto de Exploración Geotérmica, cuyos trabajos de campo comenzarán en enero de 1984, responderá a nuestras expectativas y hará posible la explotación de nuestros recursos en beneficio del país.



2.10 ESTADO ACTUAL DEL PROYECTO GEOTERMICO DE HONDURAS

EMPRESA NACIONAL DE
ENERGIA ELECTRICA

1. INTRODUCCION

Este documento ha sido preparado para el Seminario Latinoamericano de Exploración Geotérmica, a realizarse en Ecuador, durante el período del 5 al 9 de septiembre de 1983, incluido el mismo en el contexto del Programa Latinoamericano de Cooperación Energética (PLACE).

2. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

En 1976, Honduras inició actividades en la exploración del Recurso Geotérmico por intermedio de una Misión Técnica de Naciones Unidas. Partiendo de esta evaluación inicial, en 1977 ENEE suscribió un Contrato con la Compañía GEONOMICS Inc., de USA, para realizar una investigación preliminar de algunas áreas, pero por problemas financieros de dicha Compañía, el trabajo quedó incompleto. Sin embargo, mapas geológicos, geofísica preliminar y geoquímica, se llevaron a cabo sin aportar resultados finales.

En 1978, Honduras requirió nuevamente asistencia de Naciones Unidas y, para ese tiempo esta entidad organizaba el Programa Energético del Istmo Centroamericano. Después de una evaluación de los estudios realizados por GEONOMICS, el Proyecto Geotérmico de Honduras se incluyó dentro del Sub-Programa Geotermia del Programa Energético Regional del Istmo Centroamericano.

En 1979 se decidió bajo dicho programa, realizar un reconocimiento hidrogeoquímico en el cual se inventariaron 128 manifestaciones, recolectando a la vez 111 muestras de agua y 11 de gas para análisis e interpretación geoquímica. Estos análisis e interpretaciones, estuvieron a cargo del Sub-Contratista GEOTHERMEX Inc., de USA.

Los resultados del estudio hidrogeoquímico establecieron un ordenamiento para futuras investigaciones (Anexo 2).

El anexo 2 consiste en un mapa de localización de las principales surgencias termales del país.

3. ESTADO ACTUAL DE ESTUDIOS EN ZONAS DE INTERES

Por la falta de financiamiento, la ayuda técnica de Naciones Unidas concluyó en julio de 1980, aún sin llegar a realizar la prospección geofísica propuesta como siguiente paso.

La ENEE después de la campaña hidrogeoquímica, realizó bajo sus propios medios, estudios geológicos superficiales a una escala 1/25,000 en las áreas seleccionadas denominadas: PLATANARES, SAN IGNACIO y AZACULPA, cubriendo áreas hasta de 70 km cuadrados.

Considerando el nivel actual del estudio y enmarcándolo dentro de la metodología de OLADE, la fase de reconocimiento realizada carece de una relación vulcanológica e hidrogeológica, así como también de un estudio geoquímico complementario en las áreas seleccionadas y establecimiento de modelos de mezclas en los mismos.

4. PROBLEMAS ENCONTRADOS

Evaluando el informe final del estudio hidrogeoquímico, se puede apreciar que el mismo carece de algunos datos que son relevantes en un reconocimiento geotérmico.

Tales datos son los relacionados con un estudio geológico-vulcanológico y también hidrogeológico. Sin este conocimiento no se pueden establecer los modelos geotérmicos preliminares, por lo tanto, uno de los problemas fue no haber seguido una metodología específica.

Para este tipo de estudios es necesario muchas veces disponer de facilidades de contratación en servicios locales, como laboratorios para análisis químicos y otros servicios que el país no tiene.

5. NECESIDADES PRINCIPALES

El proyecto Geotérmico de Honduras enfrenta varias necesidades, las que pueden resumirse en el orden siguiente:

Necesidades Financieras

Las actividades del Proyecto se paralizaron en 1980, ya que la ayuda técnica de Naciones Unidas concluyó en esa fecha. A partir de entonces, OLADE y ENEE, han mantenido relación estrecha para la búsqueda de financiamiento, negociaciones aunque activas hasta el momento no han fructificado.

Aunque el Proyecto ha estado estático, la ENEE ha mantenido la Unidad Ejecutora-Recursos Humanos, para estar preparada para el momento de la reactivación del proyecto, al mismo tiempo, desde la paralización del mismo en los años posteriores, se ha aprobado en el presupuesto, el renglón correspondiente a Geotermia en fondos nacionales, como contrapartida a los esperados fondos externos.

Necesidades de Recursos Humanos Especializados

A pesar de que en 1979-1980 se disponía de un Consultor de Naciones Unidas, se ha sentido la necesidad de preparar técnicamente el personal nacional en las dife-

rentes disciplinas que participan en un desarrollo geotérmico; aunque en parte OLADE ha aliviado estas necesidades con la Organización de Seminarios y Cursos.

6. RECURSOS HUMANOS DISPONIBLES

En la estructura de la Empresa, como parte de la División de Ingeniería está la Unidad de Geotermia, que ha sido la Unidad ejecutora del Proyecto Geotérmico de Honduras.

Dicha Unidad está compuesta por un jefe y dos Subalternos como personal permanente y varios temporales.

DISPONIBILIDAD ACTUAL

Puesto	Profesión / Estudios
Jefe de Unidad	Ingeniero Civil con especialización en Geología.
Geólogo	Geólogo con estudios de post-grado en Geotermia.
Geólogo	Geólogo/seminarios de Geotermia y curso en Ingeniería Geológica.
Geólogo (temporal)	Geólogo con especialización en Geotermia.
Técnica en Geofísica	Ingeniero Civil / prácticas de campo.

7. INCIDENCIA DEL DESARROLLO GEOTERMICO EN EL SECTOR ENERGIA

En los objetivos planteados en la Estrategia para el Desarrollo 1982-86 del Gobierno de Honduras, el Sub-Sector de electricidad seguirá entre otros el siguiente objetivo: "Intensificar los estudios del Potencial Hidroeléctrico", pudiendo lograr este mediante la "definición de un programa de investigación y desarrollo del Potencial Hidroeléctrico y Geotérmico".

Actualmente la generación eléctrica está basada en hidroeléctrica y térmica, contando con una capacidad instalada alrededor de 200 MW, de la cual el 40 o/o dependen del petróleo y sus derivados, lo que significa una seria fuga de divisas para el país.

La capacidad de generación instalada permite solamente dar servicio a no más del 30 o/o de la población, lo que exige un programa acelerado para la evaluación, desarrollo y explotación de los recursos naturales propios, tales como la hidroelectricidad y la geotermia.

Aunque también está previsto que para 1985 el Proyecto Hidroeléctrico el Cajón, entrará en operación con una capacidad de 292 MW, esta oferta de energía eliminará la dependencia de los hidrocarburos hasta 1989, pero a partir de ese momento nuevamente entrará la dependencia de las plantas térmicas, y es aquí donde la geotermia puede aliviar la demanda debido a que ENEE no cuenta al presente, con un sitio potencial para desarrollo hidroeléctrico en el futuro.

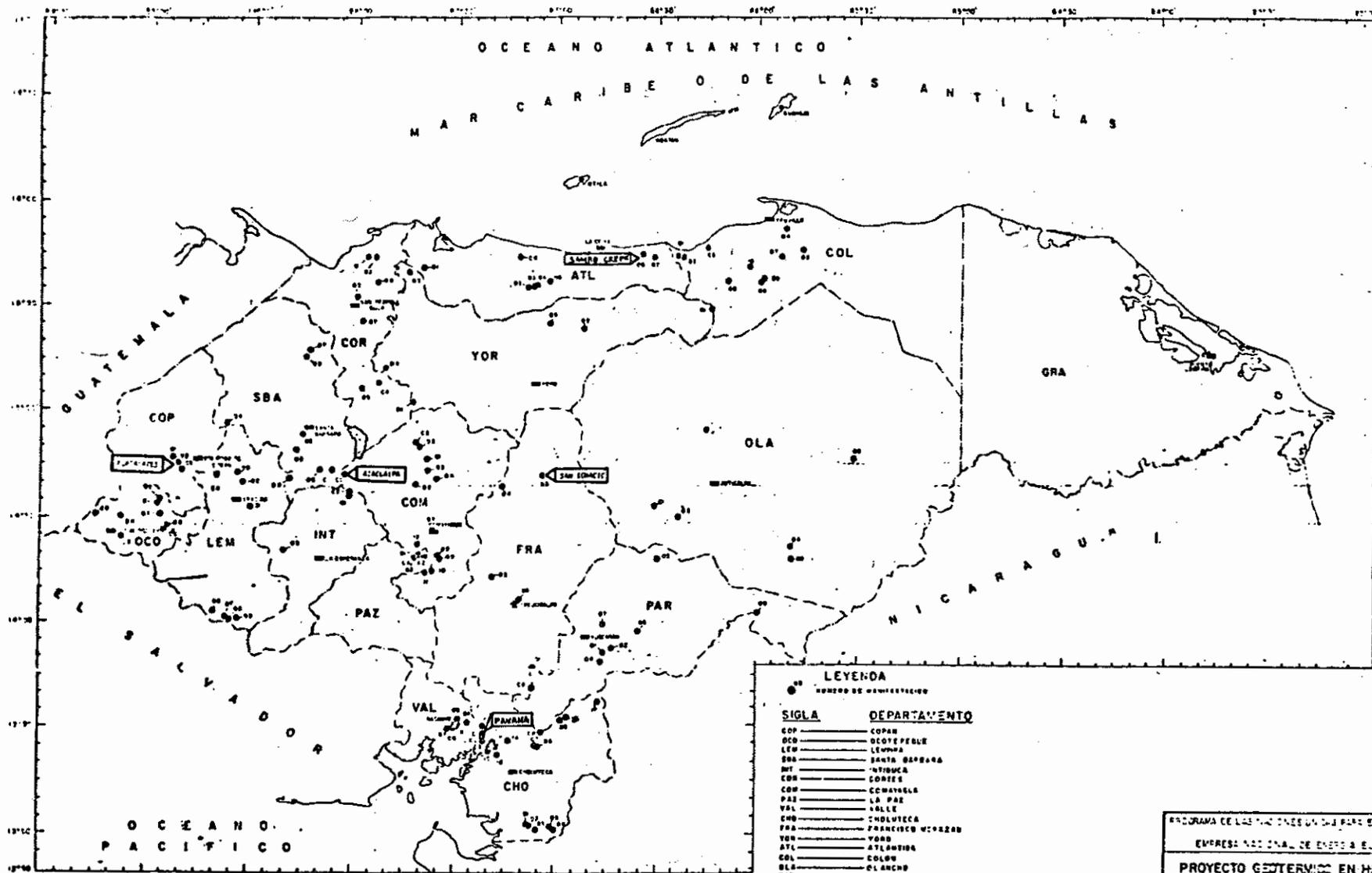
A N E X O 2

CLASIFICACION DE MANIFESTACIONES GEOTERMICAS EN HONDURAS

CATEGORIA	PROSPECTO	TEMPERATURA APROXIMADA DE RESERVORIO C	
		MINIMA	ISITOPOS (SO ₄ - H ₂ O)
<u>INTERES PRINCIPALES</u>	1. San Ignacio (FRA-03)	205 ⁺ 10	220-240
	2. FLATANARES (COP-03)	200 ⁺ 10	220-240
	3. AZACUALPA (SBA-05)	185 ⁺ 10	175-190
	4. EL OLINGO (PAR-03)	170 ⁺ 10	
	5. SAMBO CREEK (ATL-06)	195 ⁺ 10	150
<u>INTERES SECUNDARIOS</u>	6. Pavana (CHO-11)	150 ⁺ 10	
	7. TRINIDAD (COM-04)	150 ⁺ 20	
	8. EL OLIVAR (COR-04)	150 ⁺ 20	155-167
	9. SAN RAFAEL (INT-01)	150 ⁺ 10	
	10. LIMONES (OLA-01)	150 ⁺ 20	
	11. LOS ALMENDROS (OLA-05)	150 ⁺ 10	
<u>INTERES TERCERARIOS</u>	12. Humuya (COM-11)		
	13. AGUACATES (COR-05)		
	14. QUEBRADA GRANDE (OLA-02) TODAS		100-150
	15. AGUA CALIENTE (COR-01)		
	16. AGUA CALIENTE (PAR-07)		

CLASIFICACION DE MANIFESTACIONES GEOTERMICAS EN HONDURAS

CATEGORIA	PROSPECTO	TEMPERATURA APROXIMADA DE RESERVOIRIO C	
		MINIMA	ISOTOPOS (SO ₄ - H ₂ O)
PRINCIPALES	1. San Ignacio (FRA-03)	205 [±] 10	220-240
	2. Platanares (COP-03)	200 [±] 10	220-240
	3. Azacualpa (SBA-05)	185 [±] 10	175-190
	4. El Olingo (PAR-03)	170 [±] 10	
	5. Sambo Creek (ATL-06)	195 [±] 10	150
INTERES SECUNDARIOS	6. Pavana (CHO-11)	150 [±] 10	
	7. Trinidad (COM-04)	150 [±] 20	
	8. El Olivar (COR-04)	150 [±] 20	155-167
	9. San Rafael (INT-01)	150 [±] 10	
	10. Limones (OLA-01)	150 [±] 20	
	11. Los Almendros (OLA-05)	150 [±] 10	
INTERES TERCEARIOS	12. Humaya (COM-11)		
	13. Aguacates (COR-05)		
	14. Quebrada Grande (OLA-02)	TODAS	100-150
	15. Agua Caliente (COR-01)		
	16. Agua Caliente (PAR-07)		



LEYENDA

● NÚMERO DE MANIFESTACION

SIGLA	DEPARTAMENTO
COP	COPAN
DCO	DCOTEPEQUE
LEM	LEMPERA
SBA	SANTA BARBARA
INT	INTIBUCA
COR	CORTEZ
COM	COMAYAGUA
PAZ	LA PAZ
VAL	VALLE
CHO	CHOLUTECA
FRA	FRANCISCO MORAZAN
YOR	YORO
ATL	ATLANTIDA
COL	COLON
OLA	OLANCHO
PAR	PARAISO
GRA	GRACIAS

PROGRAMA DE LAS MANIFESTACIONES GEOTERMICAS	
EMPRESA NACIONAL DE ENERGIA Y ELECTRICIDAD	
PROYECTO GEOTERMICO EN HONDURAS	
MANIFESTACIONES GEOTERMICAS	
PE-80	PROYECTO PLANIFICADO
PE-80	
PE-80	
IMPRESO	FECHA 28/05/79
CELOS REVA	FRANCISCO

ALTA

2. 11. LA GEOTERMIA EN MEXICO - INVESTIGACION Y DESARROLLO

Instituto de Investigaciones Eléctricas
Cuernavaca, Morelos, México

1. Resumen

En el IIE se efectúan actividades de investigación aplicada, para apoyar los esfuerzos de la CFE, en el incremento de la capacidad a instalar en centrales geotermoeléctricas, incluyendo el desarrollo de los campos geotérmicos. Las actividades se agrupan en 4 áreas: exploración, desarrollo del campo, explotación y plantas de generación.

La CFE es el organismo encargado del desarrollo de la Geotermia en México. Tiene en operación la central de Cerro Prieto I, con 180 MW, y pequeñas unidades con 25 MW en Los Azufres. En construcción tiene las centrales C.P.II y C.P.III de 220 MW cada una, que entrarán en operación en 1984 y 1985. Se tienen también varios campos en exploración, entre ellos: Los Humeros, Puebla; La Primavera y San Marcos, Jalisco; Araró, Michoacán; Tulechec y Ríto, B.C., entre otros.

2. Actividades de Investigación

En el IIE se efectúa, en base a un programa previsto, una serie de estudios e investigaciones en apoyo de la geotermia. Dicho Programa de Geotermia está concebido principalmente para apoyar los esfuerzos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en el incremento de la capacidad de instalar en centrales geotermoeléctri-

cas, incluyendo el desarrollo de los campos. Este Programa, el cual se revisa cada año, se realiza con base en consultas efectuadas principalmente con personal de la CFE, con el fin de fijar prioridades en la solución de los problemas existentes.

En general, todas las actividades de este programa se pueden agrupar en cuatro áreas: exploración, desarrollo del campo, explotación y generación eléctrica.

El área de exploración es la más pequeña. En la especialidad de geofísica, existen grupos de investigación en instituciones académicas, a las cuales se les da apoyo para no duplicar esfuerzos. Se realizan o se han realizado proyectos en la evaluación de los métodos y técnicas de percepción remota, magnetoteléfrica y microsismicidad, como herramientas complementarias a las convencionales que utiliza la CFE en la exploración geotérmica. El Instituto tiene la capacidad correspondiente en el área de geoquímica, para muestrear, analizar e interpretar información geoquímica durante la exploración superficial de los campos geotérmicos.

En el área de desarrollo de campos se tienen diversas actividades: - en lodos de perforación y cementos para terminación de pozos, se busca correlacionar los problemas observados en el campo, con los fenómenos de degradación de las propiedades físicas y químicas de estos materiales; los cuales son observados en ensayos de laboratorio y pruebas de pozos, teniéndose como meta encontrar soluciones prácticas que reduzcan los costos. También en esta área se busca sustituir mezclas y aditivos de importación por equivalentes nacionales. - Se ha observado que en los pozos se producen incrustaciones que bloquean el flujo, forzando una costosa limpieza mecánica de los mismos; se buscan métodos más sencillos para realizarla. - La corrosión de las tuberías es un proceso detectado que en ocasiones provoca el colapso en los pozos; se está tratando de conocer el tipo y los mecanismos que la causan para buscar medidas preventivas. - Se ha integrado un laboratorio para reali-

zar mediciones en condiciones simuladas del fondo del pozo, en el cual se determinan las propiedades físicas de las rocas, con el fin de que sirvan como alimentación al análisis y modelado del mismo. En esta última área, se está desarrollando capacidad para realizar análisis de pruebas de pozos, así como para utilizar los modelos numéricos existentes, con el fin de realizar actividades de ingeniería de yacimientos.

En las áreas de explotación y generación eléctrica se ha efectuado un esfuerzo importante. Se han realizado varios trabajos de ingeniería básica de centrales, así como de ingeniería de detalle de algunos subsistemas de las mismas, los cuales han mostrado la necesidad de desarrollar manuales de diseño, que se han iniciado con aquellos correspondientes a equipos de superficie, como separadores, evaporadores y silenciadores. También se están efectuando estudios para diseño de sistemas, en donde existe flujo de dos fases. Experimentos de campo han validado análisis teóricos, para realizar el diseño de tuberías con flujo de dos fases en Cerro Prieto. Con el fin de experimentar más a fondo en estos fenómenos, se ha diseñado un laboratorio de mecánica de fluidos, que se espera construir en un futuro cercano. En lo referente a instrumentación del campo, para incrementar la confiabilidad de la central y adquirir la mayor información posible, se ha diseñado un sistema para medir y almacenar los parámetros más importantes.

Con fines de diseño y también para la optimización de operación de las unidades, se ha realizado la caracterización de las incrustaciones geotérmicas en los equipos superficiales y se ha efectuado la evaluación técnico-económica de la mejor forma de prevenir las o removerlas. En aspectos de contaminación, se han estudiado diferentes opciones para la disposición de salmuera, como el exitoso proceso para extraer el cloruro de potasio, cuya planta industrial se encuentra en proceso de construcción. Así mismo, se evalúa la producción y concentración del ácido sulfhídrico en las centrales y sus alrededores. Se diseñó un sistema computarizado

de informática para captar, almacenar y reproducir información técnica generada en el campo de Cerro Prieto, que sirve de apoyo a la toma de decisiones.

Para evaluar los conceptos avanzados de conversión de la energía geotérmica en energía eléctrica, se realizó un estudio comparativo desde el punto de vista de eficiencias energéticas. Se han instalado en el campo de Los Azufres, equipos de ciclo binario de 10 y 50 KW, con los cuales se efectúan pruebas utilizando salmuera geotérmica con fluido primario, estudiándose a la par la problemática de los cambiadores de calor, principalmente lo relacionado con incrustaciones. Se participó también en las pruebas realizadas en el campo de Cerro Prieto con una máquina de flujo total, evaluándose su comportamiento.

Esta es, en síntesis, la descripción de actividades de investigación, en apoyo de la geotermia que se efectúan en el IIE a través del Programa de Geotermia, el cual evoluciona y se adecúa principalmente en función de las necesidades y del desarrollo geotermoelectrico de la Comisión Federal de Electricidad.

3. Estado actual de las investigaciones en cada área

El desarrollo de los proyectos geotérmicos para generar electricidad, al igual que los hidroeléctricos o termoeléctricos, es función de la Comisión Federal de Electricidad.

El desarrollo actual de la energía geotérmica en México, se ha enfocado principalmente a dos grandes regiones geotérmicas: el Valle de Mexicali y el Eje Neovolcánico, en los cuales se encuentran gran parte de los 400 sitios con alteraciones hidrotermales que se han inventariado en el país.

En el Valle de Mexicali, situado en el Noroeste de México, se tiene actualmente el mayor desarrollo geotérmico. En 1973, dos unida

des de 37,5 MW cada una, iniciaron su operación utilizando vapor separado de 5,3 Kg/cm². En 1979, entraron en operación otras dos unidades similares, para completar un total de 150 MW de capacidad instalada.

Los pozos que alimentan dicha central denominada "Cerro Prieto I", producen una mezcla de agua vapor. En cada pozo se tiene un separador operando a 7 Kg/cm². El vapor se conduce a la unidad de generación y la salmuera a una laguna de evaporación, desechándose una elevada cantidad de energía. Después de analizar la situación, el IIE propuso a la CFE la factibilidad de generar 30 MW adicionales, mediante evaporación instantánea de la salmuera caliente a presiones de 3,5 y 1,5 Kg/cm², utilizando una turbina de doble presión. Esta última unidad entró en operación en 1981.

Actualmente dos centrales más, Cerro Prieto II y Cerro Prieto III, están en construcción. Cada central tendrá dos unidades de 110 MW, con lo cual Cerro Prieto tendrá para 1985 una capacidad instalada de 620 MW.

Adicionalmente, en los alrededores de Cerro Prieto, en el Valle de Mexicali, se efectúan exploraciones profundas, habiéndose detectado temperaturas medias y elevadas en pozos perforados en las localidades de Ríto, Tulechek, Aeropuerto, etc., en donde existen elevadas probabilidades de contar con reservorios explotables económicamente. En el Valle de Mexicali se ha estimado una capacidad instalable del orden de 1500 MWE.

La otra región geotérmica denominada "Eje Neovolcánico", está localizada en la parte central del país. Consiste de una franja de varios kilómetros de ancho y 900 Km de largo, con más de 3000 aparatos volcánicos y un elevado número de manifestaciones hidrotermales. Actualmente se efectúan exploraciones superficiales y perforaciones profundas en 15 sitios, concentrándose los esfuerzos en Los Azufres, Michoacán; La Primavera, Jalisco; y Los Humeros, Pue

bla.

En Los Azufres se tienen 34 pozos perforados, siendo la mayor parte excelentes productores, con suficiente vapor para instalar 100 MW. Un estudio preliminar del reservorio indicó una capacidad instalable de 300 MW.

La primera unidad de Los Azufres, tendrá una capacidad de 55 MW, la cual entrará posiblemente en operación en 1986. Actualmente se tienen cinco unidades de 5 MW cada una, instaladas a boca de pozo, dos de éstas operan con pozos de vapor seco y tres con pozos de agua-vapor, siendo necesario en este último caso, reinyectar la salmuera de desecho, debido al alto contenido de boro.

En el campo de La Primavera, localizado a unos cuantos kilómetros de Guadalajara, se tienen 4 pozos exploratorios, los cuales reportaron elevada temperatura de fondo y descargas medias de agua-vapor.

En el campo Los Humeros, se han perforado cuatro pozos exploratorios profundos con excelentes resultados, teniéndose temperaturas de fondo de más de 300°C, producciones de vapor separado de hasta 70 Ton/h y un pozo de vapor seco.

4. Programa futuro

La CFE tiene programado alcanzar como mínimo una capacidad instalada de 2000 MW para el año 2000, existiendo la posibilidad de llegar a 4000 MW, la cual se considera totalmente factible, con base en los resultados obtenidos en las exploraciones mencionadas.

5. Perspectivas del Recurso

El futuro de la energía geotérmica es promisorio, ya que es un recurso económicamente competitivo. Comparativamente presenta menos

riesgos que otras fuentes energéticas, con pocos problemas de con
taminación y con innumerables usos no eléctricos. Se encuentra
ampliamente distribuida en todo el mundo, por lo cual, la importan
cia que puede llegar a tener en México, dependerá de varias condi-
ciones, algunas indirectas tales como el precio del petróleo, cana
lización de recursos, etc., y otras directas, que tendrán que aten
derse, como son la solución de problemas técnicos de los sistemas
existentes y sobre todo, la posibilidad de utilizar a gran escala
los recursos geotérmicos de media y baja entalpía, que son los más
abundantes en el país.

2.12. ESTADO ACTUAL DEL PROYECTO GEOTERMICO DE NICARAGUA

Instituto Nicaraguense de Energía, INE
Managua, Nicaragua

1. Introducción

La crisis energética a nivel mundial, creada por el aumento desmedido en los costos del petróleo, afecta considerablemente a los países que no disponen de este recurso.

La geotermia, en aquellos países que tienen posibilidades de explotación de este recurso, podría sustituir parcial o totalmente la energía generada mediante el uso de combustibles fósiles.

En el caso específico de Nicaragua, gran parte de la generación de energía eléctrica descansa en los hidrocarburos, por tal razón el aprovechamiento de los recursos geotérmicos se vuelve imperiosa en esta nación.

Por su estructura geológica, Nicaragua es un país con grandes perspectivas geotérmicas, razón por la cual el Gobierno Revolucionario, ha creído conveniente incrementar los estudios y las prospecciones, que puedan llevar al país a una pronta y extensa utilización de este Recurso Natural.

Los resultados positivos obtenidos en el proyecto Geotérmico en Momotombo, han venido a constituir un estímulo para continuar vigorosamente estos estudios a nivel nacional.

2. Cronología de las Actividades desarrolladas

La actividad geotérmica en Nicaragua se remonta al año 1966, cuando una Misión de la firma Consultora ELECTROCONSULT, arribó al país con el objetivo de examinar la existencia de campos geotérmicos.

Después de hacer investigaciones geológicas y vulcanológicas, definieron cinco diferentes regiones de interés geotérmico conocidas como:

1. Litoral del Pacífico
2. Norte de Nicaragua
3. Depresión Nicaraguense
4. Altiplanicies Internas
5. Litoral del Atlántico

Las tres primeras interesaron y fueron consideradas por los expertos como de mayor interés geotérmico.

En junio de 1969, el Gobierno de Nicaragua celebró un Contrato con Texas Instrument Incorporated, para llevar a cabo investigaciones en la región occidental del país, cuyos objetivos fueron: localizar y delinear un campo o campos de potencial geotérmico; compilación de datos en manifestaciones termales; mapeo geológico regional y detallado; levantamiento geofísico y geoquímico; perforación de pozos poco profundos para medición de gradiente y perforación de un pozo profundo exploratorio.

Basándose en los estudios realizados, la Texas Instrument Inc. clasificó 10 sitios de potencial geotérmico, los cuales son:

- Fumarolas del Volcán Momotombo Sur
- Fumarolas de San Jacinto - Tizate
- Fumarolas del Volcán Telica - Najó

- Area termal del Lago Jiló - Apoyeque
- Area termal del Volcán Mombacho
- Fumarolas del Cerro Colorado
- Fuentes termales de Tipitapa
- Pozos termales de la Hacienda
- Agua Caliente Villa Salvadorita
- Fuentes termales de San Luis

Los estudios finalizaron en febrero de 1971, concluyendo en que: El área de fumarolas del volcán Momotombo, mostraba fuertes indicios de que en el subsuelo de este lugar, podría encontrarse un reservorio comercial de energía geotérmica, capaz de soportar una planta eléctrica de 35 MW o más. Igual situación se presenta en el área de fumarolas de San Jacinto, cuyas características indicaran la existencia de un reservorio con potencial comercial de energía geotérmica.

A petición del Gobierno de Nicaragua, una misión de especialistas visitó el país en mayo de 1971, con el objeto de examinar los trabajos ya realizados y formular sus recomendaciones. La misión confirmó las principales conclusiones y recomendó la ejecución de un programa amplio de explotación.

En cumplimiento de esas recomendaciones, el Gobierno presentó al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, una solicitud de asistencia técnica y financiera, que fue aprobada por el Consejo de Administración en enero de 1972.

Los objetivos inmediatos eran continuar con el programa establecido por el Gobierno en 1969; es decir:

- a) Demostrar por medio de perforaciones de pozos profundos, que uno de los campos, Momotombo o San Jacinto, presentaban perspectivas desde el punto de vista de la competencia comercial, con la producción suficiente de vapor de agua para una central geotermoeléctrica de 30 MW.

- b) La elaboración de diseño preliminar y un estudio de factibilidad técnica y económica para una planta de generación eléctrica.

El 23 de diciembre de 1972, un terremoto de proporciones catastróficas azotó a la ciudad de Managua, capital del país, causando la destrucción de Oficinas, archivos e instrumentación. A comienzos de marzo de 1973, el Gobierno decidió reducir temporalmente el avance del proyecto y llevar solamente a término, los estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos, que ya habían sido comenzados y se encontraban en etapas avanzadas. El proyecto fue concluido en diciembre de 1973, con la presentación del informe técnico final.

Los estudios e investigaciones de reconocimiento ejecutados bajo este plan de trabajo, se limitaron a las zonas de Momotombo y San Jacinto-Tizate, habiendo confirmado la existencia de dos campos geotérmicos de 10 Km² y 7 Km² de extensión respectivamente, con temperaturas de fondo estimadas, mayores de 230°C.

A fines de 1973, el Gobierno decidió poner a cargo de la Empresa Nacional de Luz y Fuerza (ENALUF), hoy INE, la terminación del programa de exploraciones geotérmicas. Para finalizar el programa original del Gobierno, ENALUF contrató el 15 de mayo de 1974, los servicios de la Compañía Consultora Italiana, ELECTROCONSULT, con el objeto de completar los estudios del proyecto Momotombo, por medio de perforaciones profundas de exploración y elaborar el diseño preliminar y estudio de Factibilidad Técnica Económica de la planta de generación eléctrica. Así mismo ENALUF contrató en mayo de 1974, a la Compañía de Perforaciones FORAMINES, para la perforación de cuatro pozos de doble propósito, exploración/producción cuyas profundidades serían del orden de los 600 y 900 metros, o en caso necesario éstas podrían alcanzar profundidades máximas de 1200-1700 metros.

Una vez concluidos los trabajos mencionados en el párrafo anterior y, para completar las perforaciones, ENALUF contrató en agosto de 1975 a la Compañía ENERGETICOS, S.A., para perforar 12 pozos de producción y a la

Compañía Consultora California Energy Company Inc., para la planeación y supervisión de las perforaciones arriba mencionadas. Los trabajos con estas compañías terminaron en el año 1978.

En septiembre de 1976, ELC presentó el Informe final de Factibilidad de la Primera Planta Geotérmica a instalarse en el campo de Momotombo, con las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Existe un reservorio de poca profundidad entre los 300 y 400 metros, cuyos pozos ya están perforados y medidos, capaz de soportar la producción de 30 MW, en el término de la vida útil de una planta.
2. Se debe continuar con investigaciones adicionales que cubran geología, geofísica, geoquímica y topografía; por otro lado es necesario continuar con las perforaciones y pruebas de los pozos, tanto para producción como para reinyección. El propósito de estos estudios es definir mejor las características del campo y evaluar su potencial actual.

En el año de 1980, se firma un convenio de cooperación técnica entre el INE y OLADE, para desarrollar un estudio de pre-factibilidad en el área comprendida entre los volcanes El Hoyo-Momotombo y San Jacinto-Tizate. Este estudio se lleva a cabo mediante un financiamiento de OLADE (Fondo Especial de OPEP), con asesoría extra-regional y como contraparte nacional INE.

Tomando como base el estudio de factibilidad efectuado por ELECTROCONSUT en 1976 y pruebas de producción de corto y largo plazo hechas en 1979 y 1980, se empezó en 1981, la construcción de la primera Planta Geotermoeléctrica en Momotombo de capacidad 35 MW y cuya terminación está programada para el presente mes de septiembre de 1983.

En 1982, mediante una donación del Gobierno Italiano y con aporte económico local y personal técnico del INE como contraparte, se llevó a cabo la prefactibilidad del área comprendida entre las ciudades de Gra

nada-Masaya-Nandaime,

En este estudio se definió el modelo geotérmico preliminar del área seccionada y se recomendó efectuar las perforaciones someras (Pozos de Gradientes), para ubicar posteriormente los pozos de exploración-producción.

3. Estado actual de las investigaciones en el área de Momotombo

El campo geotérmico de Momotombo, se localiza en la zona Oeste de Nicaragua, precisamente en la margen norte del Lago de Managua y la falda sur del homónimo volcán.

El área de los pozos y la planta son fácilmente alcanzables por carretera desde Managua. La distancia que hay que recorrer es de aproximadamente 90 km y la carretera está asfaltada por dos tercios (hasta La Paz Centro). La altura promedio del campo es de unos 100 m.s.n.m.

El volcán Momotombo, uno de los más familiares paisajes de Nicaragua, tiene forma regular de cono simétrico; alcanza los 1.200 m y cubre una superficie de 65 km².

La cercanía del campo geotérmico con el volcán, indujo a estudiar el riesgo volcánico presente en el Proyecto Geotérmico de Momotombo.

GEOLOGIA

La ubicación vulcano-tectónica de la cordillera de Los Marrabios, de la cual el Volcán Momotombo forma parte, está controlada por uno de los más complejos ejemplos de interacción entre las placas litosféricas terrestres. Los bordes de cuatro de estas placas son tanto convergentes como divergentes, produciendo así una multitud de fallas; transformantes, distensivas, comprensivas etc., las cuales generan estructuras tales como fosas de alta mar, arcos insulares, graben, cordilleras volcánicas, etc.

Directamente en la zona de Los Marrabios, el borde occidental de la placa del Caribe pasa encima de la placa de Cocos. Esta última se hunde en la Fosa Centroamericana, justo unos 100 km afuera de la costa de Nicaragua. Sobre la placa del Caribe existe la evidencia de una zona distensiva, la cual se manifiesta mediante el graben de Nicaragua, el cual tiene unos 60-80 km de ancho y corre subparalelo a la Fosa Centroamericana. El volcán de Momotombo se localiza sobre el borde suboccidental de la Depresión Nicaraguense, en un punto donde dicha depresión cambia de rumbo.

El basamento local de las volcanitas de Momotombo, interceptado parcialmente por los pozos geotérmicos, incluye una secuencia de derrames lávicos, piroclásticos y aglomerados con intercalaciones de estratos delgados de piroclásticos fosilíferos retrabajados, los cuales se localizan en la parte más profunda de los pozos. Estratigráficamente esta secuencia se puede correlacionar fácilmente, utilizando el mapa de correlaciones estratigráficas de Parson (1972), con el grupo de sedimentos y cenizas del Coyol Inferior, de edad miocénica medio-superior. Esta unidad está cubierta por los aglomerados, lavas y cenizas del Coyol Superior, de edad plio-pleistocénica; por último con la reactivación del vulcanismo en el pleistoceno, toda la secuencia fue recubierta por productos efusivos volcánicos.

Estudios anteriores (CECI 1979, IECO 1980), subdividieron la columna estratigráfica perforada por los 32 pozos geotérmicos, en ocho unidades distintas. Esta columna estratigráfica está constituida por productos volcánicos de composición variable, desde basáltica hasta dacítica, presentándose principalmente en sus equivalentes piroclásticos; existen sin embargo, coladas lávicas en número suficiente para facilitar, ya sea la clasificación petrográfica, como la correlación entre los pozos.

La unidad más profunda contiene calizas marinas fosilíferas de edad miocénica superior.

La correlación de los niveles claves permitió confirmar o negar la exis-

tencia de fallas inferidas por otras técnicas de observación, (especialmente fotos de satélite por medio del método de radar con apertura sintética), y calcular la dirección y tamaño de los desplazamientos de dichas fallas. La combinación del mapeo por fotos radar y de investigaciones de detalle de la litología, permitió la redacción de un nuevo mapa del área, bastante diferente si se lo compara con versiones anteriores.

POZOS

En Momotombo existen dos etapas de perforación de pozos; una que va de noviembre de 1974 hasta agosto de 1978 y otra que va desde octubre de 1982 hasta junio de 1983.

TUBERÍA UTILIZADA EN LOS POZOS DE EXPLOTACION DEL CAMPO GEOTERMICO DE MOMOTOMBO

D.E. TUBERIA	PROFUNDIDAD	
	EXPLORACION (m)	EXPLOTACION
PULGADAS		
20	0-20 (C)	0-20 (C)
13 3/8	20-250 (A)	20-250 (A)
9 5/8	250-840 (P)	150-350 (P)
7		350-600 (L)

Nota:

- (C) Conducción
- (A) Anclaje
- (P) Producción
- (L) Liner

En la primera etapa se perforan 32 pozos, de los cuales 20 son productores y 4 de reinyección. En la segunda etapa se perforaron 3 pozos, de

los cuales uno es de producción (para la segunda unidad) y los otros dos son de reinyección.

Las técnicas de perforación y terminación de los pozos geotérmicos empleadas en Momotombo, han sido semejantes a las que se han aplicado a los pozos petrolíferos, con la diferencia de que se ha utilizado en la cementación, aditivos de cementación especiales, tubería de producción de rosca más resistente y lodos de perforación enfriados mediante la utilización de una torre de enfriamiento.

CARACTERISTICAS QUIMICAS

Se efectuaron análisis químicos sobre muestras procedentes de todos los pozos, las cuales fueron recolectadas a boca pozo, mediante separación y condensación del vapor; se recolectaron también unas muestras profundas (-1 500 m), obteniendo resultados similares.

La química indica que el campo es de agua dominante, con características cloro-sódicas. Los geotermómetros (Na-K-Ca, Na-K; SiO₂), indican temperaturas dentro del rango de las medidas, con desviaciones del orden de 10 a 20°C. La distribución de los cloruros a -300 m.s.n.m. indican una forma muy similar a la de los mapas de temperatura al mismo nivel.

No se observan diferencias notables de composición y de concentración, entre las aguas de los pozos profundos y las producidas por los pozos más superficiales (como MT-2 y MT-3). Este hecho indica que el acuífero de los pozos menos profundos es abastecido directamente por el flujo ascendente desde el Oeste-Noroeste, sin que se verifiquen apreciables fenómenos de mezcla con el acuífero frío que se introduce desde el Este.

Tampoco es posible desconocer, en base a los datos geoquímicos disponibles, los indicios de una tendencia evolutiva hacia una gradual intrusión de agua menos caliente, a causa de la explotación.

Cabe mencionar sin embargo, que en la historia geoquímica del campo de Momotombo, falta una buena continuidad en la recolección de muestras y, a veces una precisión química analítica, suficiente como para apreciar pequeñas variaciones en la composición y/o concentración de los fluidos. En adelante se precisará un monitoreo geoquímico de los pozos, muy regular y cuidadoso, para vigilar este importante aspecto que incide grandemente en el manejo del campo.

El vapor separado contiene un promedio en gases de 1.1% en peso; siendo la casi totalidad de estos anhídrido carbónico.

CARACTERISTICAS PRODUCTIVAS DEL CAMPO

El campo de Momotombo está constituido por dos reservorios geotérmicos localizados a diferentes niveles; el primero o subsuperficial es alimentado por uno más profundo a través de una zona de fracturas por fallas.

La mayoría de los pozos perforados hasta la fecha interceptan el reservorio somero, cuyas características fundamentales son por lo tanto, mucho más conocidas que las del reservorio profundo. Este último únicamente ha sido interceptado por los pozos MT-10 y MT-4. Para una explotación intensiva del campo, es preciso que la extracción afecte también el acuífero profundo; en efecto, el tamaño del sistema superficial considerado como isla cerrada, no permitiría instalar más de los 35 MW durante un plazo de 20 años.

El análisis por modelado matemático ha subrayado, además, que la explotación del sistema profundo, mediante dos unidades de 35 MW, no puede efectuarse solamente aprovechando la subida natural del fluido a través del sistema de fallas; en esta hipótesis, en efecto, el abatimiento de presión en el acuífero somero resultaría tan alto, que la resultante presión de reservorio necesaria para inducir el flujo vertical hacia este último, no alcanzaría a sustentar el caudal necesario en

CARACTERISTICAS QUIMICAS DE LAS AGUAS GEOTERMICAS EN CAMPOS

AGUA - VAPOR

UBICACION	PROF.			PPM									
	T°C	(M)	pH	Na+	K+	Mg++	Ca++	Fe+++	Cl-	SO4=	AS++	B	102
HVERAGERDI - ISLANDIA	216	650	9.6	212	27	--	1.5	0.1	197	61		0.6	480
NGAWHE-NUEVA ZELANDIA	360	585	7.4	950	80	*	28	0.1	1625	17		1200	460
MEXICALI-MEXICO	340	1285	ND	5820	1570	8	280	0.2	10420	12		12.4	74000
SALTON SEA-CALIFORNIA	340	1600	4.7	50400	17500	54	28000	2290	155000	5	12	390	400
SENKYORO-JAPON	150	ND	1.2	5000	--	4000	400	3770	68800	84000	6.4	470	--
AHUACHAPAN-EL SALVADOR	230	900	7.0	6120	995	10	416	--	11000	27	--	162	663
NICARAGUA		DS	8	2180	400	0038	84	--	3976	18.1	1.4	47	550

Nota:

(*) Incluido en el análisis de Ca+++

ND No hay información

DS Descarga superficial

Tabla 1

- 120 -

CARACTERISTICAS QUIMICAS DE LOS GASES EN CAMPOS GEOTERMICOS

AGUA - VAPOR

UBICACION	% GAS/VAPOR	% CO ₂	% H ₂ S	% +HICROCARB	% H ₂	% N ₂ +Ar
BROADLANDS - NUEVA ZELANDIA	0.61	94.8	2.1	1.2	0.2	1.5
MEXICALI - MEXICO	0.54	81.4	3.6	7.0	0.5	7.0
OTAKE - JAPON	0.10	96.7	0.65	-	-	2.70
AHUACHAPAN - EL SALVADOR	0.2 (a)	94.0	6.0	-	-	-
MOMOTOMBO - NICARAGUA	(0.5)*	93.37	1.07	2.41	0.74	2.41

Nota:

(a) % por peso

(*) % por volumen

Tabla 2

los pozos.

La estrategia de explotación propuesta prevé por ende, estas líneas fundamentales de desarrollo:

- a) Perforar unos pozos en la zona de subida del fluido, para explotar directamente el acuífero profundo. El número de pozos a perforarse depende de sus características, pero puede estimarse entre 2 y 4; (uno ya fue perforado en 1983).
- b) Utilizar los pozos ya disponibles para el abastecimiento, desde el acuífero somero, de la primera unidad y para un parcial abastecimiento de la segunda.
- c) Conectar el sistema de tubería de conducción de vapor a un número de pozos mayor de lo estrictamente necesario, para permitir una mayor elasticidad de operación y mantenimiento, alternando los pozos en producción.

CARACTERISTICAS DE PRODUCCION

A pesar de que los pozos interceptan el mismo acuífero, hay evidentes diferencias entre las características de producción de los mismos, debido a la intrínseca deshomogenidad de los acuíferos fracturados. En particular, la tendencia a evolucionar hacia la producción de vapor seco, no depende solamente de la profundidad del horizonte productivo, sino parece ser influenciada también por las distribuciones de temperatura y permeabilidad en el acuífero.

Por lo tanto, para establecer las características de producción necesarias para el proyecto, tanto de la turbina, como de los sistemas de acarreo y de reinyección, se utilizaron los criterios siguientes:

- a) Para los pozos ya existentes se emplearon los datos del caudal y entalpía proporcionados por las pruebas de campo; una variación de

características productivas fue considerada solamente para uno de ellos, que ya había manifestado tendencias evidentes hacia un aumento de entalpía durante las pruebas.

- b) Para los pozos nuevos a perforarse en el reservorio profundo, se hizo referencia a los datos de temperatura disponible para evaluar el nivel entálpico y a los datos de producción del pozo MT-4 (desviado y de diámetro reducido), y MT-10 para predecir el caudal de pozos de diámetro regular (9" 5/8). Se subraya, sin embargo, pese a la producción seca de los pozos antes dichos, que se consideró una entalpía "de proyecto" de 1 400 kJ/kg. En efecto debido a la mencionada deshomogeneidad local, la producción de vapor puede ser consecuencia de un abatimiento local de presión, acoplado a una estratificación del fluido; no se estimó, por ende, prudente atribuir esas condiciones a todos los pozos de la nueva área.

CARACTERISTICAS BASICAS DE LA PRIMERA UNIDAD DE MOMOTOMBO

La primera unidad geotermoeléctrica de Momotombo, actualmente en construcción y, cuya puesta en marcha está prevista para septiembre de 1983, tiene una potencia bruta de 35 MW. La Planta es del tipo a una sola etapa de evaporación.

DATOS BASICOS DE OPERACION

		Operación Nominal	Régimen Máximo Continuo
Potencia	KW	35 000	40 370
Factor de potencia (cos)	--	0.85	0.98
Presión de admisión en turbina	bar	7	8.1
Presión al colector de vapor	bar	7.35	8.5
Presión al condensador	bar	0.125	0.145

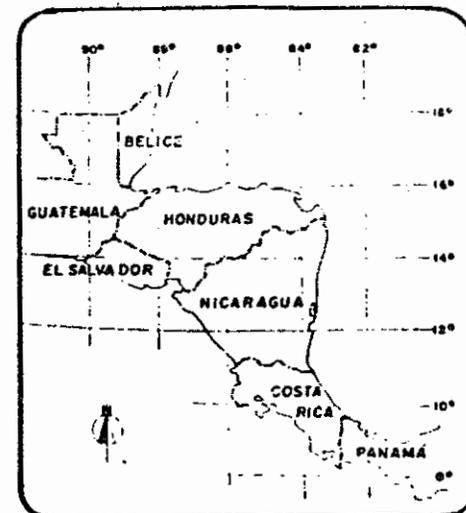
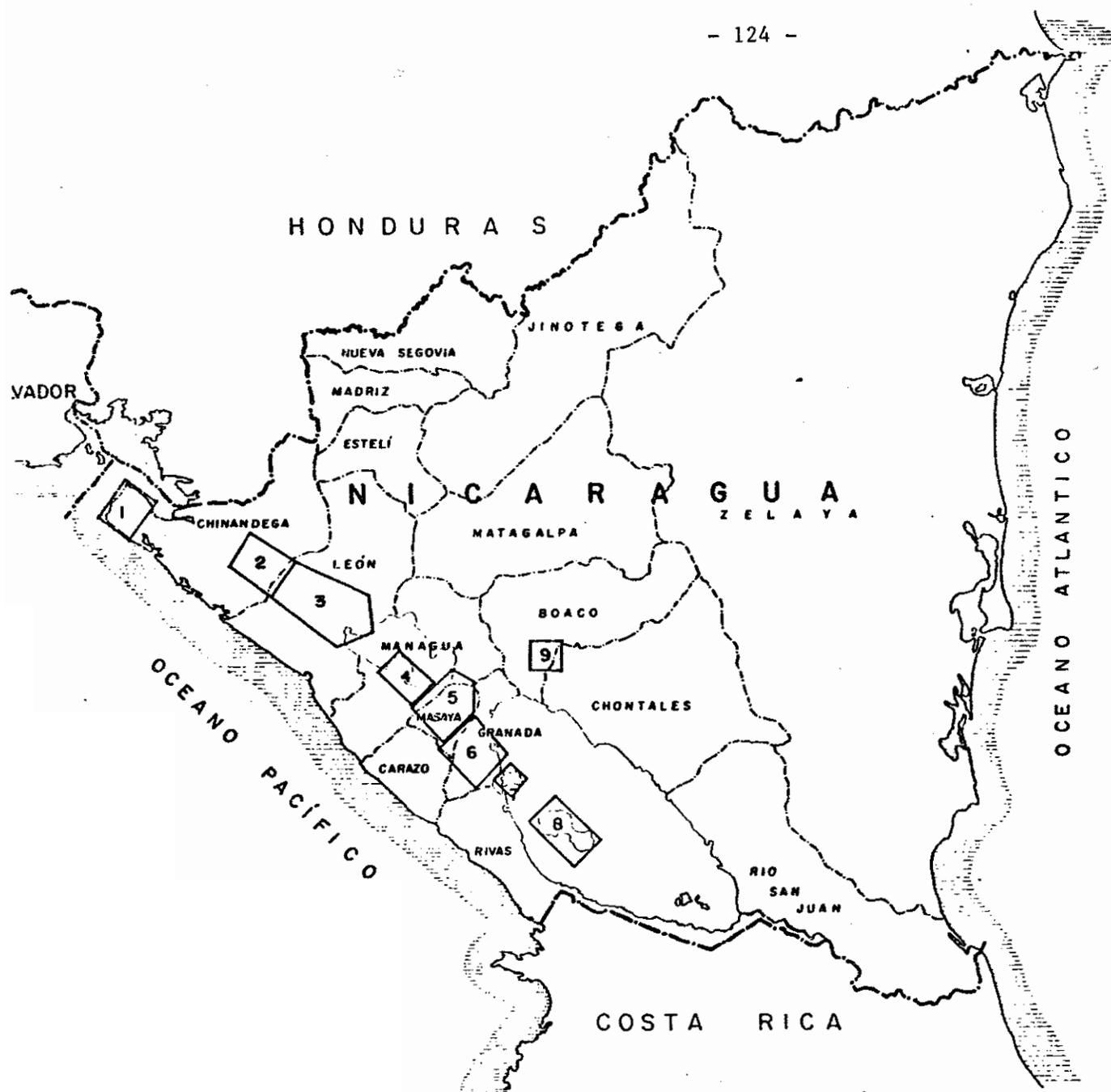
CARACTERISTICAS DE PRODUCCION DE LOS POZOS PRODUCTORES

POZO	CAUDAL TOTAL (kg/s)	CAUDAL VAPOR (kg/s)	ENTALPIA (kJ/kg)
MT-2	60	12	1 100
MT-3	95	18	1 100 (*)
MT-4	8	8	2 700
MT-9	70	13	1 100
MT-10	7 (*)	7 (*)	2 700
MT-12	20	20	2 700
MT-17	40	8	1 100 (*)
MT-19	20	4	1 100
MT-20	32	32	2 700
MT-21	34	6	1 100
MT-22	60	11	1 100 (*)
MT-23	85	16	1 100
MT-25	55	10	1 100
MT-26	90	17	1 100
MT-27	140	26	1 100 (*)
MT-31	110	12	950

Nota: (*) Se prevé evolución hacia producción de vapor seco.

DATOS BASICOS DE OPERACION

	Operación Nominal	Régimen Máximo Continuo
Caudal de vapor a las válvulas de ingreso turbina	kg/h 264.125	302.006
Caudal de vapor a los e-yectores	kg/h 15 968	15 968
Caudal total de vapor	kg/h 280 093	317 974
Consumo de los auxiliares	kW 2 200	2 200
Consumo específico bruto	kg/kWh 8.0	7.9
Consumo específico neto	kg/kWh 8.5	8.3



areas de interés geotérmico

1-	VOLCAN COSIGÜINA
2-	V. SAN CRISTÓBAL-CASITA
3-	S JACINTO, EL HOYO, MOMOTOMBO-GALAN
4-	MANAGUA - CHILTEPE
5-	MASAYA - TIPITAPA
6-	L APOYO - V. MOMBACHO
7-	ISLA ZAPATERA
8-	ISLA OMETEPE
9-	LAS LAJAS

Instituto Nicaragüense de Energía
DIVISION RECURSOS GEOTERMICOS

LOCALIZACION AREAS GEOTERMICAS
EN EL PACÍFICO

Fig. 2

POZOS DE PRODUCCION
PRIMERA UNIDAD GEOTERMoeLECTRICA MOMOTOMBO

INE
RECURSOS GEOTERMICOS

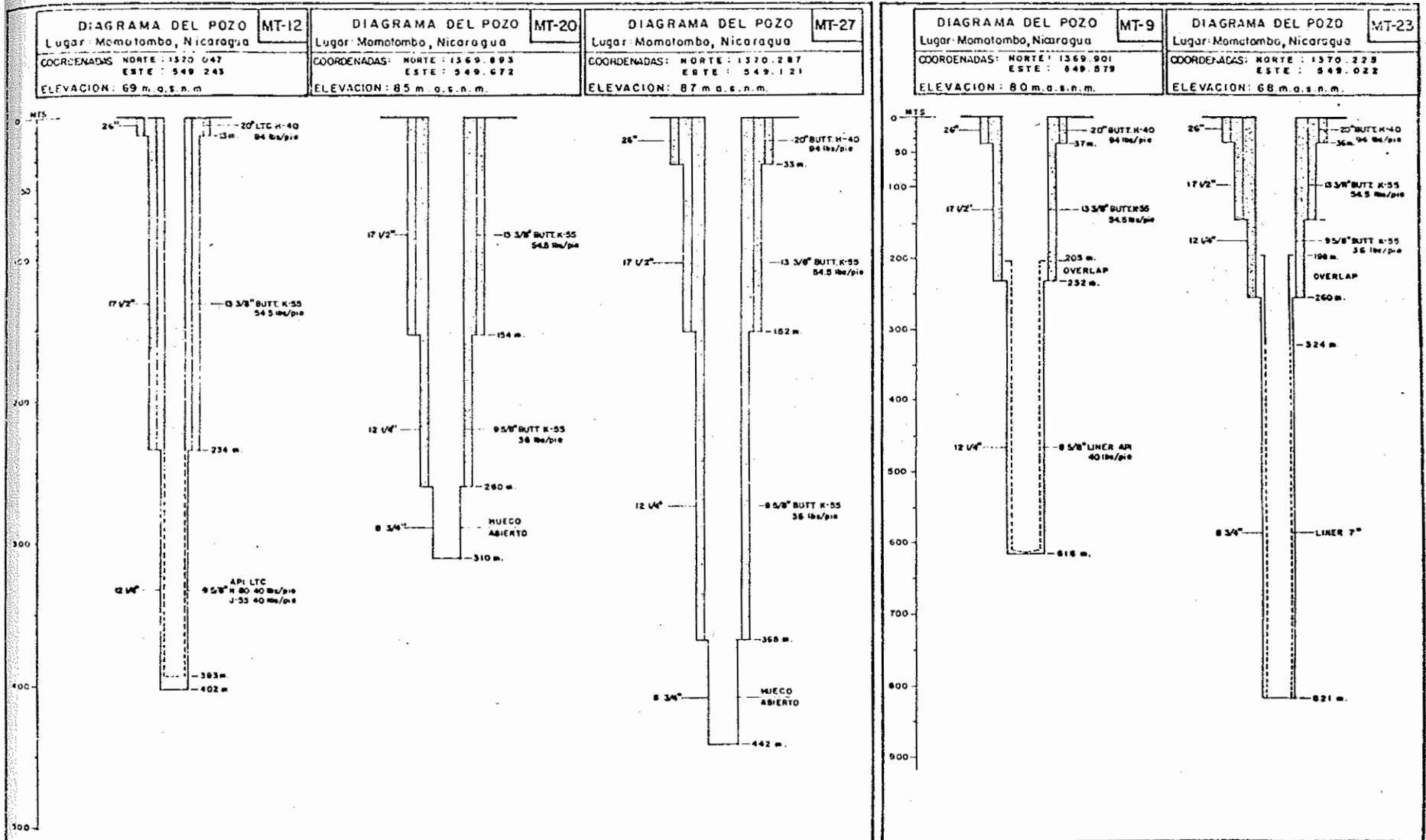


Fig. 3

POZOS DE REINYECCION
PRIMERA UNIDAD GEOTERMOCLECTRICA MOMOTOMBO

I M E
 RECURSOS GEOTERMICOS

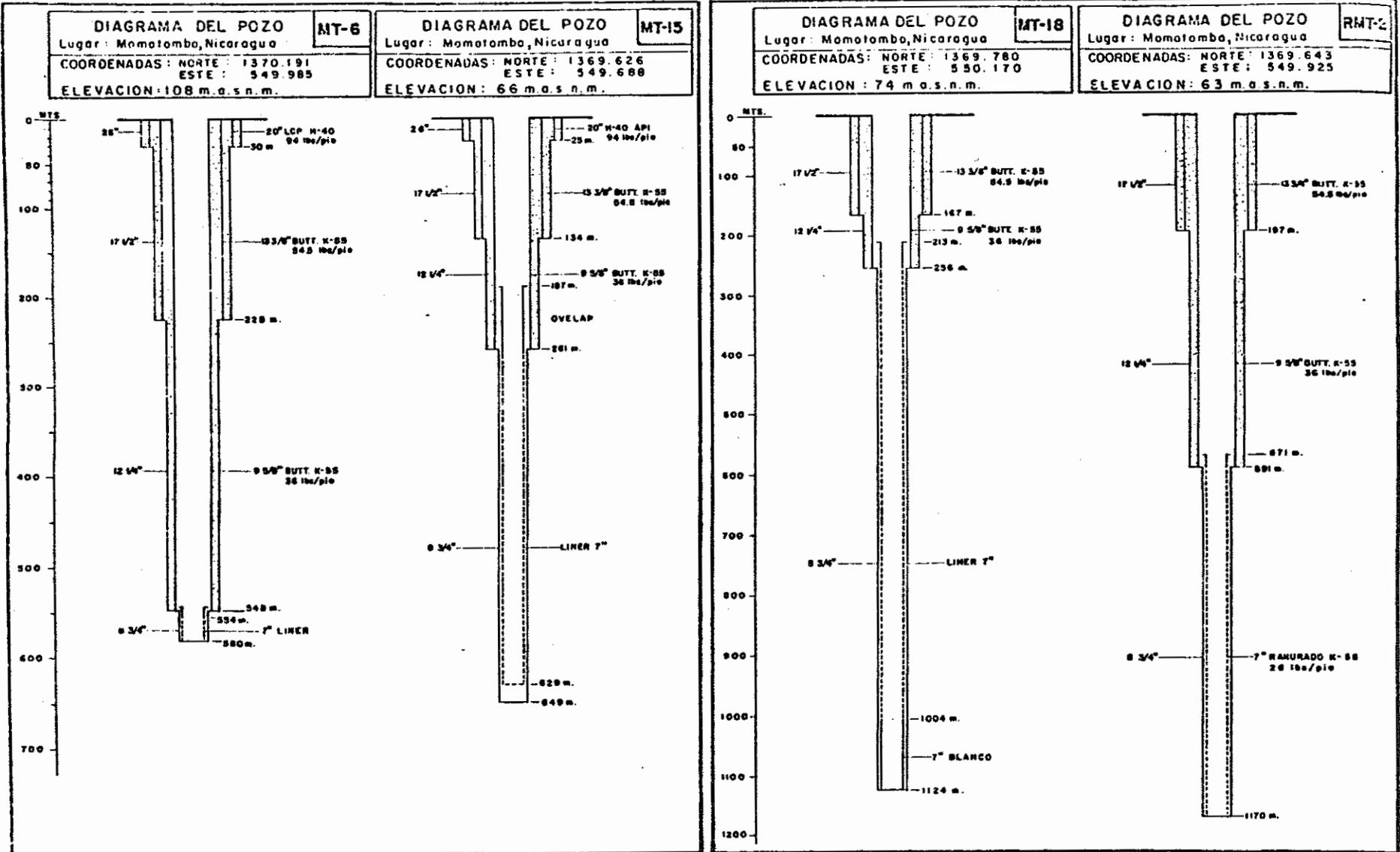
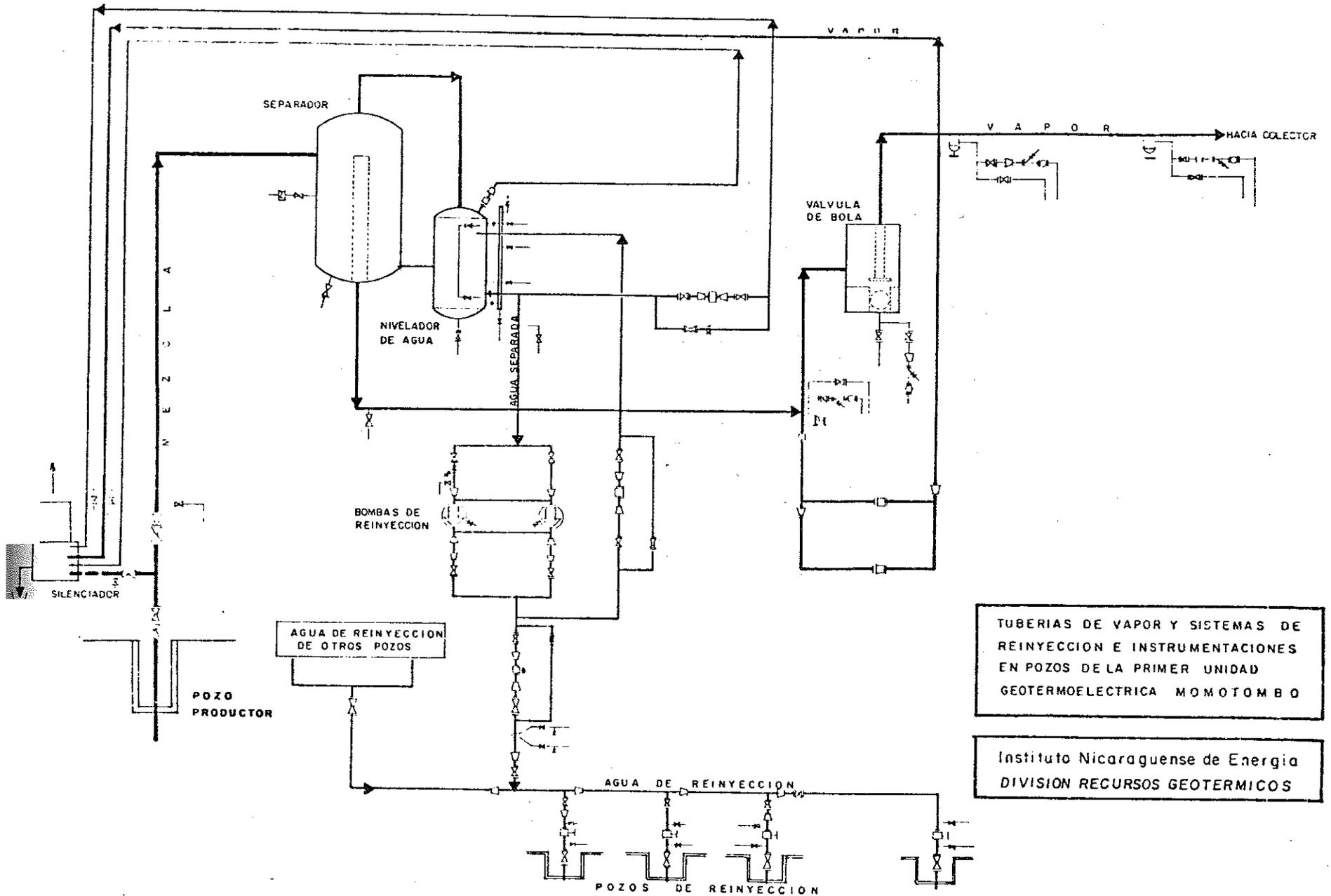


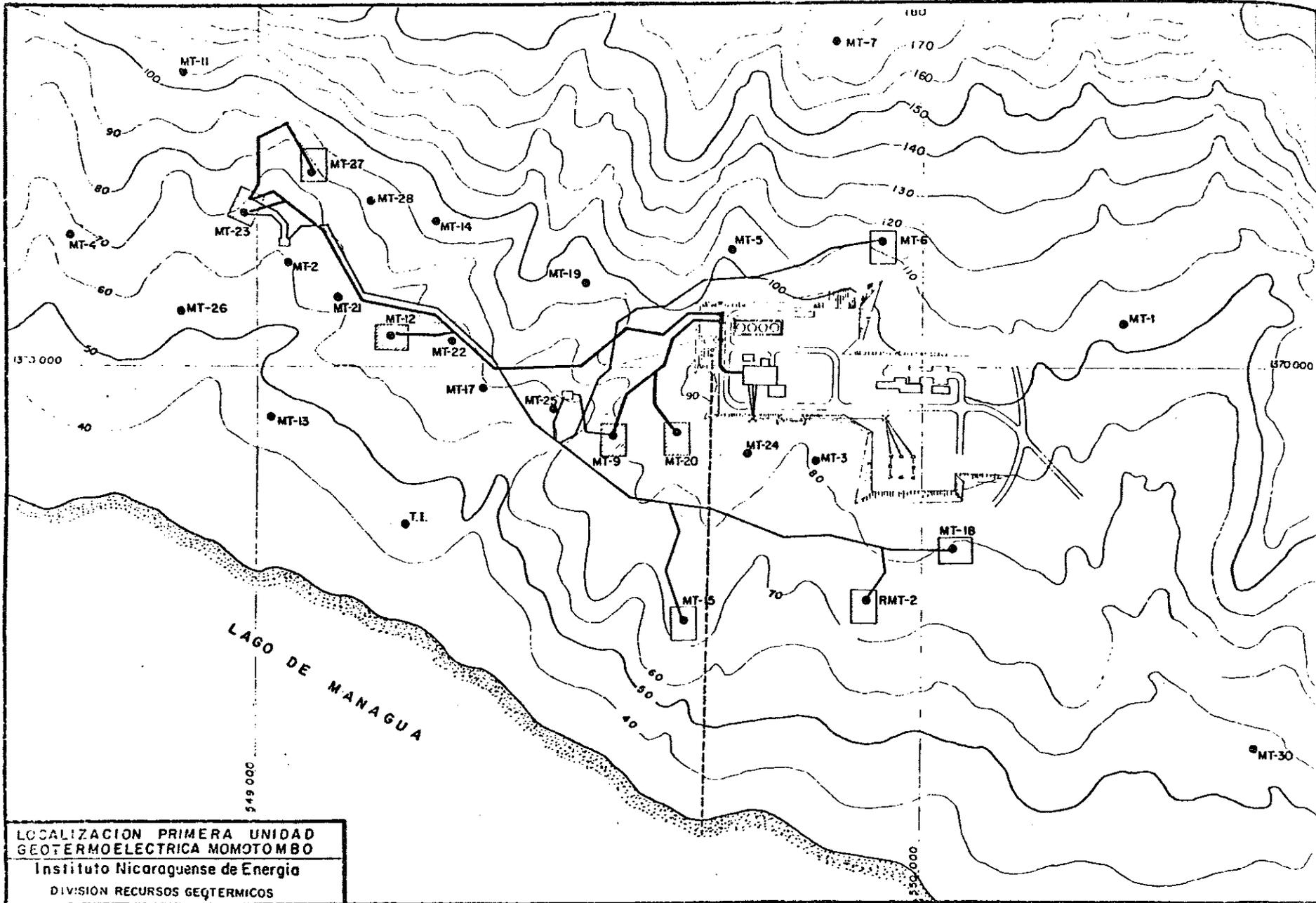
Fig. 4



TUBERIAS DE VAPOR Y SISTEMAS DE REINYECCION E INSTRUMENTACIONES EN POZOS DE LA PRIMERA UNIDAD GEOTERMoeLECTRICA MOMOTOMB O

Instituto Nicaraguense de Energia DIVISION RECURSOS GEOTERMICOS

Fig. 5



LOCALIZACION PRIMERA UNIDAD
GEOTERMOCLECTRICA MOMOTOMBO
Instituto Nicaraguense de Energia
DIVISION RECURSOS GEOTERMICOS

2.13 ESTADO ACTUAL DE LA EXPLORACION GEOTERMICA EN PANAMA

Instituto de Recursos Hidráulicos y Eléctricos IRHE
Panamá, Panamá

1. Síntesis cronológica de las actividades desarrolladas en Panamá

En 1971, el Gobierno Panameño inició los estudios preliminares de las manifestaciones hidrotermales del territorio nacional. En 1972 a solicitud de la Dirección General de Recursos Minerales, el Sr. G.R. ROBSON de Naciones Unidas, visitó Panamá para hacer una evaluación preliminar de los datos recopilados de las manifestaciones hidrotermales.

En 1973, el Ministerio de Comercio e Industria de Panamá, publicó el folleto del Lcdo. J. Mérida, "Las áreas geotermales de Panamá", en la cual se identifican 22 sitios diferentes.

En 1974, el Gobierno Panameño designó a la Corporación de Desarrollo Minero Cerro Colorado (CODEMIN), para que realizara las investigaciones geotérmicas en el país, en estrecha colaboración del Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación (IRHE), por ser esta Institución la responsable de la generación y distribución de la energía eléctrica.

A partir de enero de 1980, las investigaciones geotérmicas quedan a cargo exclusivamente del IRHE.

Las principales investigaciones geotérmicas llevadas a cabo en Panamá se han concentrado en el área denominada Cerro Pando, al Occi

dente de la provincia de Chiriquí, donde se realizaron los siguientes estudios:

Estudios geológicos

T. Kittredge (1973): realizó el levantamiento estructural del área.

CODEMIN - IRHE (1974 - 1975): realizó un inventario de las manifestaciones existentes, la geología superficial con base fotogeológica, muestreo geoquímico de gases y agua, análisis químicos, termometría y perforaciones poco profundas.

R. Stewart (1977 - 1978): de CODEMIN realizó un mapeo geológico escala 1:50,000, en un área aproximada de 1000 km², determinando nuevas formaciones geológicas, así como la existencia de un graben a lo largo de la cordillera, en el cual probablemente se concentra la actividad geotermal del área.

A. Zamora (1979): petrografa de CEL, realizó análisis petrográficos de difracción de rayos X de los núcleos de 6 pozos perforados en el área de Cerro Pando y concluyó, que este campo geotérmico presenta condiciones petrográficas adecuadas para continuar con su exploración.

Mortimer-Stewart (1980): del Institute of Geological Sciences (IGS) y de CODEMIN, respectivamente, realizaron giras de tres meses para investigar con mayor detalle algunos aspectos del informe de 1978.

Estudios geoquímicos

G. Robson (1971): hizo una evaluación preliminar de la información recopilada de las manifestaciones termales de Panamá y recomendó un muestreo geoquímico de las aguas termales y gases en Cerro Pando y Calobra

G. Cuéllar (1975): de la CEL de El Salvador, recomendó un programa de muestreo de las manifestaciones termales, tomando en cuenta las de mayor caudal y temperatura, incluyendo las que presentan mineralización, así como la utilización del equipo necesario para muestreo.

W. Mahon (1975): de Naciones Unidas, revisó los trabajos de exploración llevados a cabo anteriormente y programó nuevas investigaciones; concluyó que las informaciones obtenidas no son suficientes para determinar el potencial geotérmico del área, necesitando-se una inversión más amplia en cuanto a personal y equipo.

M Lopoukhine (1976): del B.R.G.M, de Francia fue contratado con miras a definir el potencial geotérmico de la República de Panamá. Concluyó en que, aparentemente, en la región de Cerro Pando, no hay indicios de la existencia de un yacimiento de vapor seco.

G. Sigvaldason (1978): de Naciones Unidas, a solicitud del IRHE, hizo una reinterpretación de la información geoquímica existente, incluyendo una visita al área de Cerro Pando, concluyendo que los estimados de temperatura son altos, pero no utilizables para la generación de energía eléctrica, ya que según él, esta área se encuentra en un estado de enfriamiento gradual; recomendando una evaluación geoquímica sistemática de otras áreas termales, así como también análisis químicos de agua y gases de todos los manantiales conocidos, mediciones de descargas y temperaturas.

A. H. Bath (1978): del IGS, evaluó y asesoró los estudios geoquímicos anteriores y los métodos analíticos, orientó el muestreo de las áreas termales de datos escasos y recomendó un mejoramiento en estas técnicas.

G. Gislason (1980): de Naciones Unidas, recomendó programa de muestreo geoquímico de las aguas termales en todo el país, para seleccionar las áreas más favorables, con el objeto de continuar estos

estudios y determinar el potencial geotérmico con miras a la generación de energía eléctrica.

C. Klein (1980): de Naciones Unidas, revisó, interpretó y evaluó los resultados del reconocimiento geoquímico de las aguas termales efectuado en todo el país durante 1980.

Estudios geofísicos

El personal del IGS, realizó estudios geofísicos en el área de Cerro Pando, que incluyeron investigaciones de resistividades eléctricas, magnetometría, radiometría y microsísmica.

El estudio de los Drs. Wright y Williamson en el informe WD-OS-76-14 de 1976, recomiendan desarrollar, en el Proyecto Geotérmico de Cerro Pando, un programa de investigaciones geológicas, hidrogeológicas y geofísicas.

P.G. Greenwood (1976): realizó, siguiendo recomendaciones de los Drs. Wright y Williamson, reconocimiento de resistividad en Cerro Pando, para lo cual usó un equipo marca McPhar. El objetivo de la campaña se centró en medir la resistividad aparente de las capas superficiales y señalar los efectos de la cubierta arcillosa (arriba de 30 m de espesor) descrita por Wright y Williamson.

M. K. Lee y M. E. Parker (1977): como resultado de las investigaciones realizadas por el Sr. Greenwood, los Srs. M.K. Lee y M.E. Parker, realizaron un estudio geofísico usando los métodos de resistividad eléctrica, magnetométrico y radiométrico. El estudio de resistividad demostró que no hay un gran reservorio conductivo a menos de 1/2 km de la superficie. Sin embargo, está bien demostrado que un cuerpo más profundo o una capa conductiva más delgada que esté enterrada en profundidad, no haya sido, probablemente definida por el estudio.

C. Mortimer (1977); realizó, simultáneamente a los trabajos de resistividad eléctrica, investigación microsísmica y concluyó, que a pesar de que existía un alto nivel de ruido humano y de que se tuvo fallas en los instrumentos, existe evidencia de frecuente actividad sísmica dentro o cerca del área del proyecto.

H.M. Bibby (1978) Naciones Unidas: comentó que los datos de resistividad en Cerro Pando, indican que el origen de las aguas termales yacen al norte de la región explorada geofísicamente.

Salvador García Durán (1979); de la Comisión Federal de Electricidad de México, analizó el trabajo geofísico llevado a cabo en el área de Cerro Pando y consideró que la investigación para delimitar anomalías térmicas, debería estar enfocada principalmente por los métodos eléctricos, ya que los métodos magnéticos y radiométricos no dan buenos resultados. También concluyó que el estudio geoeléctrico no fue debidamente enfocado, dada las situaciones ambientales y topográficas que se describen en el informe y el equipo que emplearon.

Estudios hidrogeológicos

Los estudios hidrogeológicos realizados en Cerro Pando, fueron llevados a cabo en su mayoría, por personal panameño con asesoramiento de los técnicos del IGS.

Ovidio Fábrega (1976) de CODEMIN, presentó las primeras consideraciones de carácter hidrogeológico en el área de Cerro Pando, describiendo en forma general algunas características de los manantiales termales y de los ríos existentes en la zona de estudio, también enumera los datos que faltan para realizar el balance hídrico.

Posteriormente, el Sr. Fábrega inició un control de caudales y variación de temperaturas en 6 manantiales escogidos entre los de mayor caudal y mayor temperatura, con el propósito de conocer la influen-

cia de la precipitación en las variaciones del flujo y temperaturas de los manantiales observados.

K.W. Williamson (1978); propuso un estudio para medir la temperatura y conductividad de los ríos y manantiales del área, con el objetivo principal de identificar los manantiales desconocidos dentro de la zona de exploración y recopilar la información hidrológica y geológica de los lugares que no habían sido estudiados en detalle. Revisó los datos colectados por Fábrega de 1976 a 1978 y consideró que eran muy pocos para hacer un análisis detallado.

Perforaciones

En el área de Cerro Pando se hicieron 6 pozos, con un total de 2620 metros perforados.

Nuevos Estudios

IRHE (1980); realizó un levantamiento de las manifestaciones termales conocidas en el país, para determinar los sitios con más posibilidades para la generación de energía eléctrica. Actualmente se conocen 37 sitios en comparación a los 22 sitios localizados a principios de la década del 70.

OLADE (1981); reevaluó los datos disponibles y realizó estudios geovulcanológicos con criterios geotérmicos. Estos trabajos permitieron:

1. La reorientación del proyecto del Complejo Geotérmico Baru-Cerro Colorado*, estableciéndose la alta prioridad de la zona y los programas de exploración requeridos según un esquema metodológico adecuado a la naturaleza geológica y volcánica del área de interés.

* Sector que incluye el área de manifestaciones termales de Cerro Pando.

2. Identificar la existencia de otras áreas potencialmente interesantes, desde el punto de vista geotérmico.

Estado de avance de los estudios

La mayoría de las investigaciones geotérmicas realizadas hasta la fecha, se han llevado a cabo en el área correspondiente a Cerro Pando. En estas investigaciones geotérmicas participaron varias organizaciones, así como consultores individuales. A pesar de que se efectuaron trabajos de geofísica, geoquímica, hidrogeología y un costoso programa de perforación de pequeño diámetro; la forma como se llevaron a cabo cada una de las investigaciones, así como, los resultados obtenidos, no nos permiten decir que se ha concluido la etapa de prefactibilidad de este proyecto.

En base a las recomendaciones presentadas por OLADE, el Gobierno Panameño, y el IRHE han obtenido la colaboración del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para la realización de los estudios de:

- a) Reconocimiento geotérmico nacional que sirvan para: (1) identificar las áreas geotérmicas del país, (2) seleccionar las áreas de interés prioritario y (3) definir el esquema geotérmico preliminar en cada una de ellas.
- b) Prefactibilidad avanzada del Complejo Geotérmico Barú-Cerro Colorado, con el objeto de definir la viabilidad de explotación del mencionado complejo geotérmico, antes de pasar a la fase de factibilidad.

La colaboración del BID se concretó el 24 de marzo de 1983, mediante la firma de convenios de cooperación técnica no reembolsable y de recuperación contingente, respectivamente.

Mayores problemas encontrados

Entre los mayores problemas encontrados durante el periodo en que se han desarrollado las investigaciones geotérmicas en el país; podemos señalar los siguientes:

1. El levantamiento geovulcanológico realizado con criterios inapropiados o no dirigidos hacia la geotermia.
2. La poca coordinación de los participantes en las investigaciones realizadas.
3. La carencia de una metodología adecuada que permitiera llevar a cabo los estudios en forma atinada.
4. La ausencia de transferencia tecnológica al personal nacional que laboró en las investigaciones geotérmicas.
5. La falta de visión en los objetivos a conseguir y los problemas a resolver.

4. Principales necesidades

Entre las principales necesidades que contamos para desarrollar las investigaciones geotérmicas podemos señalar: (1) la falta de personal técnico capacitado en las especialidades geovulcanológica, geofísica, hidrogeológica, geoquímica, ingeniería de reservorio, etc. y (2) la falta del equipo mínimo indispensable para llevar a cabo las investigaciones, tanto de campo como de laboratorio.

5. Recursos humanos disponibles

A pesar de que en el país se han desarrollado investigaciones geotérmicas por más de 10 años, no contamos con recursos humanos capacitados que pueden participar más activamente en las exploraciones

geotérmicas.

Del personal que laborará en los estudios, solamente un geólogo, cuatro técnicos geólogos y dos químicos, han recibido algún entrenamiento en varios aspectos de la geotermia. Ese mismo personal participó en algunas de las investigaciones geotérmicas, que se desarrollaron anteriormente. Como objetivo adicional de los estudios de reconocimiento y de prefactibilidad, se adiestrará en las técnicas de exploración geotérmica al personal del IRHE que participe en éstos.

Programas previstos dentro de los próximos cinco años

Los programas que se desarrollarán dentro de los próximos 5 años, estarán directamente relacionados con los resultados que se obtenga de los Estudios de Reconocimiento Geotérmico Nacional y Prefactibilidad Avanzada del Complejo Geotérmico Barú-Cerro Colorado.

Se prevé que los Estudios de Prefactibilidad futuros, serán desarrollados en las áreas seleccionadas de acuerdo al orden prioritario que se les designe en la Etapa de Reconocimiento Geotérmico. Al mismo tiempo, de confirmarse la prefactibilidad del Complejo Geotérmico Barú-Cerro Colorado, la Institución iniciará inmediatamente las gestiones para realizar el estudio de factibilidad de ese proyecto.

Durante este período, la Institución deberá realizar un esfuerzo en preparar los cuadros técnicos, que sean necesarios para continuar las investigaciones geotérmicas.

Incidencia que tendría la Geotermia dentro del Sector Energía

De acuerdo a los datos del "Balance Energético Nacional", el consu

mo de energía durante 1980 fue de 24,615 Tcals*, de las cuales 56% provienen de combustible derivado del petróleo (importado) y el 44% restante, de la leña, la hidroelectricidad y residuos vegetales (bagazo, fundamentalmente). Es significativo que el consumo nacional de energía entre 1970 y 1980 aumentó en 42%, a expensas, casi exclusivamente de los derivados del petróleo.

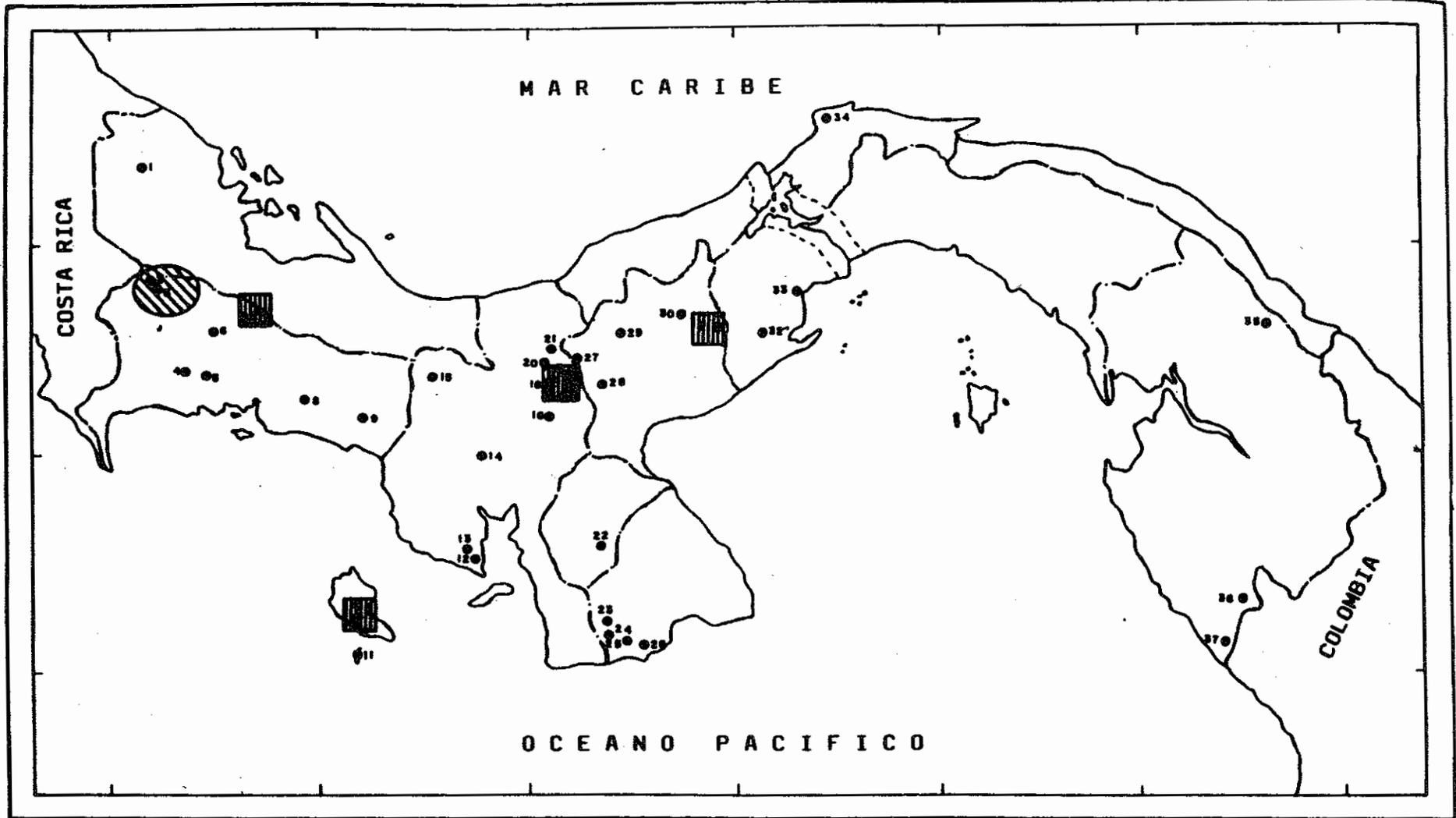
De lo anterior se deriva la necesidad de una política nacional del sector energía, que planifique a corto y mediano plazo, el aprovechamiento de los recursos energéticos del país, con el fin de reducir la dependencia de uso de petróleo.

Durante la formulación del estudio de prefactibilidad del Complejo Geotérmico Barú-Cerro Colorado, se consideró prudente ver el efecto que podría producir la inclusión de una central geotérmica en el plan de expansión del Sistema Eléctrico del País. Para tal efecto, se estimó como base un potencial energético conservador, según los expertos de OLADE, de 2 unidades de 55 MW cada una, cuyo costo estimado en base a experiencias del BID y OLADE, está entre US\$ 1,600 a US\$ 2,000/kw instalado. Este ejercicio se realizó utilizando el Modelo de Optimización Wasp III y de la comparación de los dos programas, considerados equivalente y con igual calidad del servicio, se obtuvieron las conclusiones siguientes:

- El programa de expansión geotérmico es superior en 6.4%, o sea menor en US\$ 40 millones (diferencia del valor presente neto de los costos).
- El programa de expansión con geotérmicas tiene el efecto de retrasar los costosos aprovechamientos hidroeléctricos de Changuinola I, Teribe I y Tabasará, en tres años con relación al plan base. Esto redundará en beneficios financieros especialmente en esta época en que los intereses sobre los préstamos son tan altos.

* Tcals - tera calorías = $1,163 \times 10^6$ kWh.

MANIFESTACIONES TERMALES Y AREAS DE ESTUDIOS GEOTERMICOS



Leyenda

- 1. Bonyic
- 2. Cotito
- 3. Los Pozos
- 4. Santa Cruz
- 5. Guayabal
- 6. Caldera
- 7. Hornito
- 8. Galique
- 9. Tole

- 10. Coiba
- 11. Jicarón
- 12. Farfancito
- 13. Carrizal
- 14. Barrero
- 15. Agua de Salud
- 16. El Pedregoso
- 17. Calobre
- 18. San Juan

- 19. La Laguna
- 20. Barrero Grande
- 21. Chitra
- 22. Salitre
- 23. Agua Caliente
- 24. El Cortezo
- 25. La Sapotoza
- 26. Ave María
- 27. Huacas de Quije

- 28. Olá
- 29. Santa Marta
- 30. Chiriquí Abajo
- 31. El Valle
- 32. Buenos Aires
- 33. Salitral
- 34. Guanche
- 35. Membrillo
- 36. Arreti

- 37. Jampavado

-  ZONA DE PREFACTIBILIDAD AVANZADA
-  ZONA DE RECONOCIMIENTO GEOTERMICO
-  MANIFESTACIONES TERMALES.

2.14. "PERSPECTIVAS DE DESARROLLO GEOTERMICO EN EL PERU Y AVANCES LOGRADOS HASTA EL PRESENTE"

Unidad de Investigaciones Geotermiales,
ELECTROPERU S.A.

1. Introducción

A partir del año 1975 se han llevado a cabo en Perú estudios de exploración geotérmica, por diversas entidades estatales y privadas; ELECTROPERU S.A. ha consolidado dichos estudios y en su calidad de empresa estatal, encargada de la exploración geotérmica, se ha trazado los objetivos siguientes:

- La evaluación del potencial energético aprovechable en diversas áreas geotérmicas identificadas en el Sur del Perú, cuyos estudios forman parte del Proyecto Geotérmico Sur.
- La identificación de áreas geotérmicas promisorias y la evaluación del potencial energético en una de las áreas que eventualmente se ubiquen en el Departamento de Cajamarca; dichos estudios forman parte del Proyecto Geotérmico Centro-Norte.

2. Actividades de Exploración Geotérmica desarrolladas

Los estudios de exploración geotérmica realizados en el Perú, en orden cronológico son:

Año 1975, la empresa estatal MINERO-PERU, efectuó estudios de exploración geológica y geoquímicas en el área de Calacoa en el departa-

mento de Moquegua,

Año 1976, la empresa japonesa Geothermal Energy Research and Development-GERD, durante 17 días realizó estudios de reconocimiento geotérmico en las cercanías de los pueblos de Sicuani, La Raya y Quisicollo en la región Puno-Cuzco. Los resultados geotermométricos en el área de La Raya, indican una temperatura de fondo de 130°C a 140°C.

Año 1978, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) del Perú, realizó un inventario de las manifestaciones termales conocidas en el territorio peruano, las cuales fueron agrupadas geográficamente en seis (6) regiones de interés, las cuales están ubicadas en la figura # 1; siendo estas las siguientes:

Región I	Cajamarca-La Libertad
Región II	Callejón de Huaylas
Región III	Churín
Región IV	Central
Región V	Cordillera Volcánica del Sur
Región VI	Puno-Cuzco

Años 1979 a 1980, la firma italiana Aquater y el INGENMET del Perú, con el apoyo económico de OLADE, realizaron un estudio de Reconocimiento Geotérmico en una extensión de 100,000 km². Este proyecto cubrió la Región V - Cordillera Volcánica del Sur y fue desarrollado siguiendo la metodología sugerida por OLADE para esta fase de estudio. Los resultados obtenidos han permitido identificar áreas de categoría prioritaria, las que presentan todas las condiciones geovolcanológicas e hidrogeoquímicas favorables para la presencia de sistemas geotérmicos; dichas áreas son las de Tutupaca, Calacoa, Challpalca, Laguna Salinas, Chachani y Chivay, y están representadas en la Fig. 2 "Áreas de Interés Geotérmico".

Año 1980, la empresa norteamericana Geothermal Energy Systems -

GES Ltd., por encargo de una empresa privada, realizó estudios de reconocimiento geotérmico en las áreas de Salinas, Calacoa y Tutupaca, con resultados geotermométricos alentadores.

Años de 1979 a 1983, ELECTROPERU S.A. realizó las siguientes actividades: - gestiones de reservación para exploración de las áreas de Calacoa, Tutupaca y Challapalca, - elaboración de los términos de referencia para los estudios de prefactibilidad en dichas áreas, - gestiones de Cooperación Técnica Internacional y - creación de la Unidad de Investigaciones Geotermiales.

Año 1982, ELECTROPERU S.A. y el Centro Studio Renzo Tasselli, CEN-SEN de Italia, suscribieron un Convenio de Cooperación Técnico-Económico para realizar un Estudio de Reconocimiento Geotérmico, en las zonas de "Cajamarca-La Libertad", "Callejón de Huaylas", "Churín" y "Central", las cuales cubren una extensión de aproximadamente 100,000 km². El objetivo fue delimitar las áreas de mayor interés y realizar un Estudio de prefactibilidad geotérmica en una de las áreas localizadas en el Departamento de Cajamarca.

3. Estado de avance de los estudios en cada zona

3.1 En la región Centro-Norte está en ejecución un estudio de reconocimiento geotérmico con las siguientes actividades previstas:

- a) Recopilación y análisis de los datos.
- b) Modelo Geológico.
- c) Fotointerpretación de las imágenes desde satélite e individualización de las alineaciones.
- d) Interpretación de las imágenes HCM.

e) Muestreo y análisis de aguas termales in situ.

f) Análisis químicos e isotópicos.

g) Conclusiones.

En esta etapa del estudio, no es posible utilizar en su totalidad la metodología de OLADE, por cuanto, ella está orientada al estudio de regiones volcánicas, mientras que en la región del proyecto las manifestaciones termales se suponen vinculadas con las estructuras geológicas de la región, las cuales revelan un fuerte tectonismo causado por la orogénesis del Cretáceo y movimientos posteriores, que dieron lugar a plegamientos comprimidos y fallamiento en bloques.

3.2 En la Cordillera Volcánica del Sur del Perú, se ha dado prioridad a las áreas de Tutupaca, Challapalca y Calacoa, en las cuales a partir del mes de Octubre del presente año, se debe iniciar un estudio de prefactibilidad geotérmica.

4. Mayores problemas encontrados

En el Estudio de Reconocimiento de la región Centro-Norte, se ha encontrado en Lima, problemas para efectuar los análisis químicos de las muestras de agua, por no existir un laboratorio con experiencia en análisis de este tipo. El laboratorio local que se contrató posee equipo de absorción atómica, no obstante, no lo emplea en los análisis.

5. Principales necesidades

Las necesidades que afronta el proyecto geotérmico del Perú son principalmente las siguientes:

- Necesidades financieras para desarrollar algunas actividades de perforación, comprendidas en las fases de Prefactibilidad de los proyectos Cajamarca y Tutupaca o Challapalca.
- Necesidades de equipamiento para el laboratorio de química y de la sección de geofísica.
- Necesidades de capacitación de personal nacional, en las diferentes disciplinas que intervienen en la exploración y desarrollo de los recursos geotérmicos.

6. Recursos Humanos disponibles

Actualmente la Unidad de Investigaciones Geotermales dispone del siguiente personal técnico:

- Un (1) Ingeniero Mecánico Electricista con post-grado en Bélgica
- Un (1) Ingeniero Geólogo con especialización Geotérmica en Pisa - Italia
- Un (1) Ingeniero Geólogo con especialización Geotérmica en Pisa - Italia y en Geofísica en Manizales - Colombia
- Un (1) Ingeniero Electricista
- Un (1) Ingeniero Mecánico Electricista con especialización Geotérmica en Kyushu, Japón y en "Perforación de Pozos Geotérmicos" en México.

Se cuenta, además, con la infraestructura de ELECTROPERU S.A. para los servicios y la logística.

7. Programas previstos en los próximos cinco (5) años

Las actividades programadas para los próximos cinco (5) años se resumen en el siguiente cronograma:

	<u>1983</u>	<u>1984</u>	<u>1985</u>	<u>1986</u>	<u>1987</u>	<u>1988</u>
6.1 Estudio de Reconocimiento región Centro-Norte	_____					
6.2 Estudio de Prefactibilidad en Cajamarca		_____				
6.3 Concurso de Precalificación y Negociación de Contrato Perforaciones Profundas			_____			
6.4 Estudio de Prefactibilidad en Challapalca			_____			
6.5 Estudio de Prefactibilidad en Tutupaca	_____					
6.6 Estudio de factibilidad en Cajamarca con 4,500 mts. de perforación				_____		
6.7 Estudio de Factibilidad en Challapalca o en Tutupaca con 6,000 mts. de perforación profunda						_____
8. <u>Incidencia que tendría la Geotermia dentro del Sector Energético del Perú</u>						

El desarrollo de los recursos geotermales en el Perú, se presenta como una alternativa de aprovechamiento energético que podrá en un caso, servir para afianzar sistemas hidroeléctricos ya existentes, y en otros casos, como fuente primordial de energía, por no existir en determinadas zonas del país recursos hidroenergéticos aprovechables.

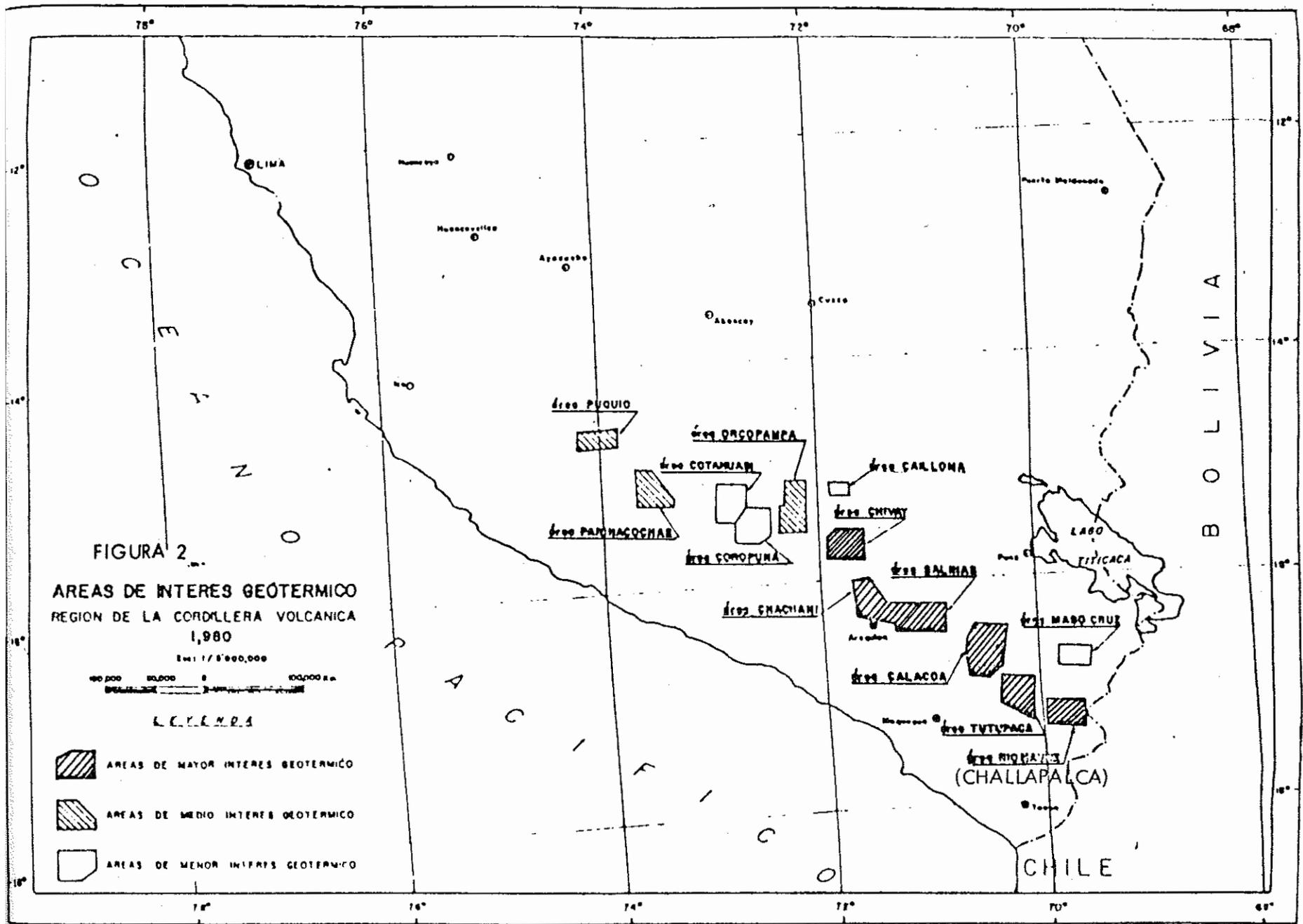
El Proyecto Geotérmico Sur, efectivamente servirá para afianzar el Sistema Interconectado Tacna-Moquegua-Arequipa, que cuenta con cen

trales hidroeléctricas de punta y centrales termoeléctricas a petróleo.

El Proyecto Geotérmico Centro-Norte, tiene por meta ubicar y desarrollar recursos energéticos en diversas áreas de esa región de la Cordillera Occidental del Perú; principalmente en Cajamarca, donde numerosos desarrollos de explotación minera, y el consiguiente progreso e industrialización de la región, esperan el hallazgo de dichos recursos energéticos para iniciar su proceso de despegue.



FIG. 1 - REGIONES GEOTERMALES



2.15 ESTADO ACTUAL DE LA EXPLORACION GEOTERMICA EN LA REPUBLICA DOMINICANA

Dirección General de Minería
Santo Domingo, República Dominicana

1. Introducción

Tectonismo y Energía Geotérmica

En escala regional, las áreas de mayor interés para la exploración geotérmica son aquellas en las cuales la corteza terrestre ha sido sometida a actividades magmáticas y tectónicas recientes, tales como el sistema andino, el área del Caribe, etc.

Las islas Española y Puerto Rico, representan la parte emergida de un elemento o bloque. Este elemento está limitado al N y E por la Fosa de Puerto Rico, al W. por la zona de extensión N-S de la Fosa Caimán y al S por el Graben Cul-De-Sac-Enriquillo, que se prolonga al E con la Fosa de los Muertos. (Fig. No. 1).

La isla Española se encuentra situada en el centro de un tectonismo de placas muy activo y desarrollado, tal como puede verse en la Figura No. 1.

La microplaca de la Española está sometida a dos grandes esfuerzos compresionales, opuestos y colineales, que han controlado a lo largo de casi toda la historia geológica de la isla su evolución geotectónica. Estos dos sistemas de esfuerzos compresionales están representados por el límite Norte de la placa mixta del Caribe, que se hunde en su movimiento hacia el Nor-Este, produciendo así zonas

de subducción y sistemas de fallas inversas de dimensiones insulares, y la placa mixta de Norteamérica que se hunde en su movimiento hacia el Oeste.

A este sistema de esfuerzos compresionales a que está sometida la microplaca dominicana (Española), sirve de tope la Dorsal de Beata, la cual surgió hace unos 5 millones de años, produciendo una zona de subducción activa entre dicha Dorsal y la microplaca dominicana (Fig. 2).

Partiendo de estas premisas, la República Dominicana (en general la Isla La Española), resultaría un área de gran interés para la exploración en la búsqueda de energía geotérmica.

2. Cronología de las actividades desarrolladas

Durante el año 1980, se realizó en la República Dominicana un estudio de reconocimiento geotérmico regional, con el objetivo de identificar, estudiar y clasificar por orden de importancia, las zonas que representarán un interés geotérmico potencial. Para este estudio se contó con la colaboración de OLADE.

Selección de las áreas en orden de su potencial interés geotérmico

En orden de importancia decreciente, las zonas seleccionadas por el estudio fueron las siguientes: (Fig. No. 3)

- a) Yayas de Viajama - Constanza
- b) Región del Graben de Enriquillo
- c) Zona volcánica de San Juan
- d) Región termal de Azua

La clasificación anterior se basa en las características geotérmicas que presenta cada área, las cuales se refieren específicamente

te a la presencia o ausencia de los elementos de un sistema geotérmico; fuente de calor genéticamente relacionada con volcanismo activo, reservorio geotérmico y cobertura impermeable.

La zona del eje neo-volcánico Yayas de Viajama - Constanza, reportó temperaturas geotermométricas del orden de los 282°C, para el geotermómetro Na/K y de 236°C para el geotermómetro Na/K/Ca. Además de las altas temperaturas de fondo, esta zona reúne todos los elementos geológicos antes citados.

3. Estado de avance de las investigaciones

Basado en las recomendaciones del estudio de reconocimiento geotérmico realizado por OLADE-BRCM, se inició en el mes de Enero del presente año, el estudio de prefactibilidad geotérmica a lo largo del eje neo-volcánico Yayas de Viajama - Constanza.

3.1 Fases del Estudio

- Fase de exploración regional:

Interpretación fotogeológica

Levantamiento geo-vulcanológico regional

Mapeo de fuentes termales y frías del área

Análisis químico de todas las fuentes termales y de algunos ríos y fuentes frías seleccionadas

Levantamiento geoquímico de radón y mercurio (Rn/Hg)

Con la conclusión de esta fase se redujo el área de interés de 3,800 km² a 140 km², (Fig. No. 4).

- Fase de exploración detallada:

Estudio geológico de detalle

Levantamiento geoelectrico (sondeos eléctricos verticales, SEV)

Levantamiento de detalle Rn/Hg

Perforación de pozos profundos de pequeño diámetro para la medición de gradientes térmicos, estudio de la alteración hidrotermal a lo largo del pozo y el estudio de las características hidrogeoquímicas de los fluidos.

3.2 Objetivos alcanzados hasta el presente

- Fase regional

Hasta la fecha se tiene completamente concluida la actividad de campo de esta fase del proyecto y se procede a la elaboración de un "Informe Intermedio".

A continuación se discute, de manera resumida, los principales resultados obtenidos durante la fase regional del proyecto:

Interpretación fotogeológica

La interpretación fotogeológica se realizó con el objetivo de comprender mejor la estructura regional del área, individualizar zonas de vulcanismo reciente y eliminar áreas de escaso interés geotérmico.

Se elaboró un mapa regional escala 1:100,000, con anotaciones cronológicas, en el cual se muestra la progresividad sistemática de edades de más de cien centros volcánicos, de los cuales los más jóvenes se encuentran hacia el NE a lo largo del lineamiento de la Dorsal de Beata (Fig. No. 4). También se compiló un mapa detallado de la zona de vulcanismo más reciente (eje neo-volcánico Constanza - Valle Nuevo), escala 1: 50.000 (Fig. No. 5). En

este mapa pueden verse tres líneas subparalelas de volcanes, con rumbo N.W. a S.E., separadas entre sí unos tres kilómetros. La primera línea, al N.E. señalada como A-A, está formada por dos coladas lávicas (los montes llanos y loma de Manuel) y representa sin duda, el vulcanismo más reciente.

Las otras dos líneas restantes, B-B y C-C, están formadas por complejos volcánicos, constituidos por varias superposiciones de conos y domos. La fotointerpretación indica que de las dos líneas de volcanes, B-B y C-C, la primera sería la más reciente.

Además, se confeccionó un mapa escala 1:100,000, en el cual se ha dibujado la densidad del lineamiento de fallas según su cobertura areal. (Fig. No. 6).

Finalmente se elaboró un plano que muestra el análisis de variación de las direcciones principales de las fallas y fracturas, delimitada en la Figura No. 6, específicamente para los sectores areales: N E, S E, S W, N W y zona central. (Fig. No. 7)

Levantamiento geovolcanológico regional

Las rocas producidas por el vulcanismo Cenozoico y Cuaternario en el área bajo estudio, son de una composición que varía desde andesitas basálticas hasta traquiandesitas. El vulcanismo está concentrado en una ancha faja con rumbo subparalelo a la traza de subducción de la dorsal de Beata por debajo de la microplaca dominicana.

Existe una clara y sistemática progresividad de edades absolutas de los centros volcánicos a lo largo del eje Yayas de Vijama - Constanza, estando los más jóvenes localizados hacia

el N E (Constanza), donde se encuentran coladas lávicas de alrededor de $0,3 \pm 0,2$ m.a. de edad, mientras que en el otro extremo (Las Yayas) el vulcanismo tiene $2,7 \pm 0,3$ m.a.

El trabajo de campo permitió individualizar unos 139 edificios volcánicos, entre los que se incluyen domos y volcanes en el sentido corriente. (Fig. No. 8).

Se efectuó un muestreo detallado de rocas que alcanzó un total de unas 90 muestras, las cuales actualmente se encuentran en proceso de estudio.

El eje ha sido dividido en dos provincias volcánicas:

- Provincia volcánica Sur Occidental Basáltico-Traquiandesítica; caracterizada por estar formada por domos volcánicos constituidos por un magma traquiandesítico con escasas evidencias de diferenciación.
- Provincia volcánica Nor-Oriental andesítico-basáltica: Las manifestaciones eruptivas ubicadas en el extremo N E de la faja volcánica, presentan características morfológicas y petrográficas particulares, que definen un magmatismo identificado por una variación litológica mínima. En esta provincia existen domos y volcanes con coladas lávicas asociada, de edades absolutas entre 1.2 y 0.3 m.a., las cuales son las más recientes de toda el área en investigación. (Figuras No. 5, 8, y 9).

La litología predominante está constituida por andesitas basálticas, que presentan variaciones de un centro volcánico a otro.

En la localidad de los Montes Llanos, se identificó una zona de alteración hidrotermal relacionada con una colada

lávica, cuya edad absoluta es de 0,3 m.a.

En la Figura No. 9, que contiene las dataciones absolutas, merece repetirse a título de observación lo siguiente:

- a) La presencia de edades absolutas recientes determinadas para las dos coladas de los Montes Llanos y Loma de Manuel, localizadas en el extremo N E del eje volcánico.
- b) La presencia de edades absolutas más antiguas para las riolitas, lo cual indica que estas coladas volcánicas pertenecen al basamento, a pesar de su apariencia joven.
- c) La progresión sistemática de las edades desde S W hasta el N E.

La Figura No. 10 muestra la correlación entre edad y distancia a lo largo del eje volcánico Yayas de Viajama - Constanza. Si tomamos un rumbo de N. 45°E para el eje, se puede calcular una progresión volcánica hacia el N E con una velocidad de progresión de 2,3 cm/año y un índice de correlación "R" entre las edades y su progresión de +0,8.

Prospección de radón y mercurio

El levantamiento regional de radón y mercurio (Rn/Hg), se llevó a cabo en el área de 3800 km² bajo estudio. El muestreo se realizó siguiendo en términos generales, el sistema de caminos, carreteros y senderos, existentes en la zona.

Se tomaron más de 1000 muestras de suelo para determinaciones de mercurio. De este total, 800 estuvieron distribuidas a lo largo del eje volcánico, con una densidad promedio de unas 2 muestras/km².

Las estaciones para el conteo de las trazas de radón, se distribuyeron a lo largo de toda la extensión del eje volcánico. Se hicieron unas 600 mediciones con densidad promedio de 2 muestras o mediciones/km² y una recuperación de 95%. (Fig. No. 11).

El estudio de Rn/Hg se realizó con el objetivo de detectar desde la superficie, zonas con indicaciones de flujos geotérmicos anómalos, que a su vez indicarían las áreas en las cuales valdría la pena intensificar trabajos de detalle, tales como: levantamiento geofísico (SEV) y perforaciones de pequeño diámetro.

En base al muestreo regional se elaboraron varios mapas escala 1:1000.000, de isoconcentraciones de los elementos bajo estudio. Además se confeccionarán histogramas de las concentraciones Rn/Hg; los cuales indican que el área posee un "nivel regional básico" de mercurio, que va desde 0 hasta 14 ppb. Para las emanaciones de radón, el "nivel regional básico" es de 0-14 PCi/L. (Figuras No. 5, 12, 13 y 14).

Todas las anomalías Rn/Hg detectadas están localizadas a lo largo del eje neo-volcánico Yayas de Viajama - Constanza, existiendo coincidencia entre los dos tipos de anomalías, solamente en la zona de Valle Nuevo, eso es, al N E del eje. En esta zona (Valle Nuevo), se encuentra además, la única alteración hidrotermal detectada en el área, la cual está asociada, como dijimos antes, a una colada lávica reciente. Lo anterior sugiere que podría haber un sistema hidrotermal activo en esta zona.

Geoquímica de las aguas

Se colectaron un total de 35 muestras de aguas termales y frías para fines de análisis químico. Al final se anexa una tabla con los resultados preliminares de la geotermometría de las aguas analizadas (véase anexo A).

Fase de exploración detallada

La fase de exploración regional definió una zona prioritaria de unos 140 km², para la realización de los estudios de detalle. Los resultados de la fase regional indican que dicha zona posee características óptimas para el desarrollo de un campo geotérmico.

Levantamiento geoelectrico

Los sondeos eléctricos verticales (SEV) están siendo llevados a cabo a lo largo de líneas rectas preperpendiculares y paralelas al alineamiento de las estructuras volcánicas, o sea con direcciones N W - S E y N E - S W, respectivamente.

Hasta el presente se han realizado unos 16 SEV, alcanzando longitudes (AB/2) de hasta 4000 m. Se ha detectado un valor de resistividad de 15 ohm-metro para el SEV número 14, a una profundidad aparente de 500 m. Según estimaciones preliminares, este valor de resistividad podría corresponder a estratos de caliza fracturada e impregnada de fluidos con alta concentración de sales.

Estudio geológico de detalle

Actualmente se están ejecutando los trabajos de campo de levantamiento geológico de detalle a una escala de 1:25.000. Se tiene planeado extender dichos trabajos varios kilómetros hacia el N E fuera de la "zona prioritaria", para verificar la posible existencia de nuevas manifestaciones volcánicas en dirección de la subducción de Beata, ya que estadísticamente se prevé un nuevo desarrollo de vulcanismo en esta dirección.

Levantamiento de detalle Rn/Hg

El estudio de Rn/Hg en la zona prioritaria fue planeado con una densidad de una muestra cada 200 m. Dicho muestreo está en fase de ejecución, habiéndose colectado a la fecha unas 700 muestras de suelo para las determinaciones de Hg y otras 255 para las determinaciones de Rn.

Los resultados hasta el presente son muy esperanzadores.

Perforación de pozos profundos de pequeño diámetro

Actualmente está en proceso la evaluación de las cotizaciones para la realización de cuatro perforaciones de pequeño diámetro en el área prioritaria, cuyas profundidades serán de unos 500 m para cada una.

ANEXO "A"

ANEXO "A"

RESULTADOS PRELIMINARES DE LA GEOTERMIA DE LAS AGUAS ANALIZADAS

RESULTADOS PRELIMINARES DE LA GEOTERMIA DE LAS AGUAS ANALIZADAS

DURANTE EL ESTUDIO DE LA PREFACTIBILIDAD EN EL AREA LAS YAYAS-CONSTANZA

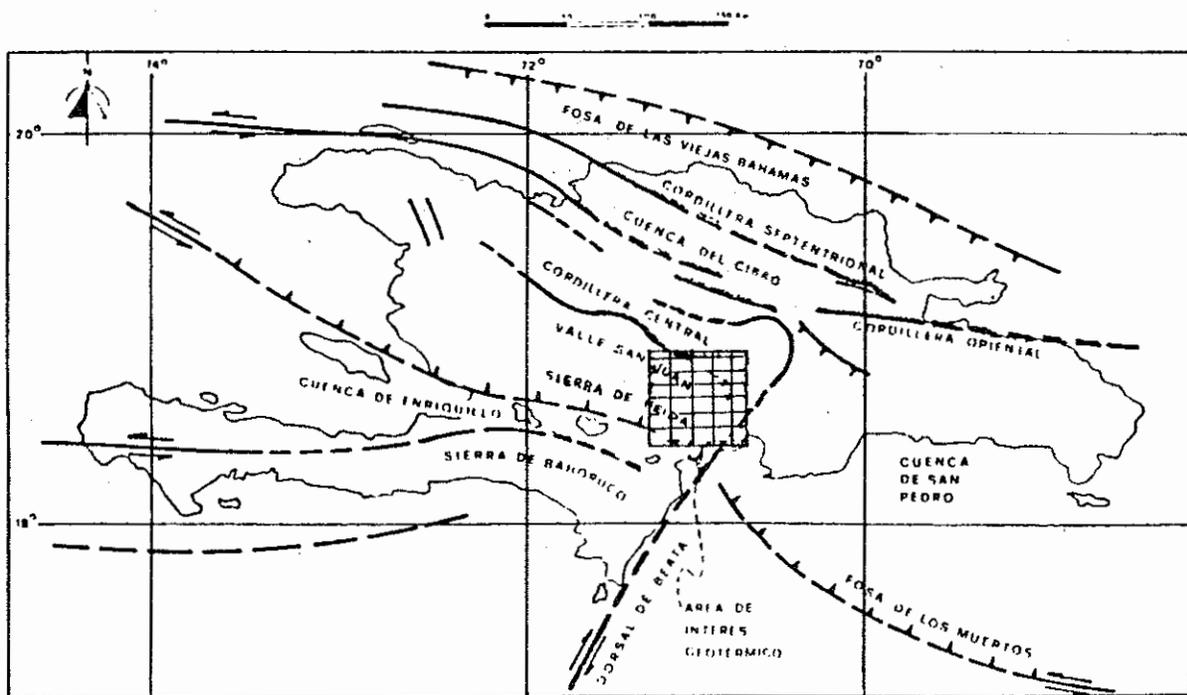
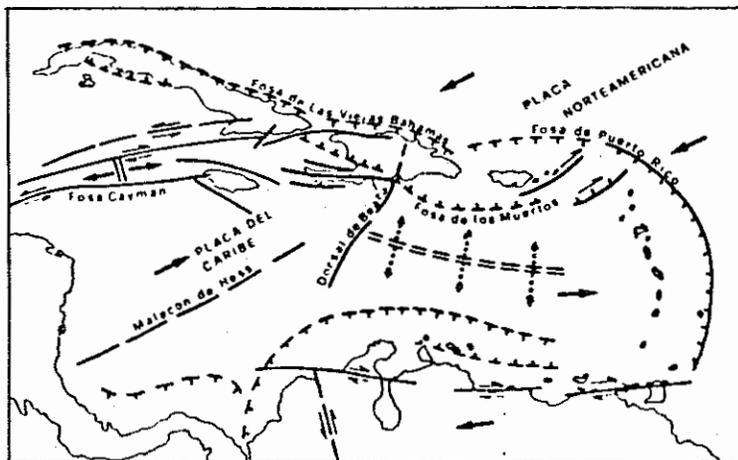
DURANTE EL ESTUDIO DE LA PREFACTIBILIDAD EN EL AREA LAS YAYAS-CONSTANZA

<u>MUESTRA</u>	<u>TEMPERATURA (°C)</u>		<u>CONCENTRACION (PPM)</u>		
	Ca/Na/K	Na/K	CA	NA	K
C-1	126.8	234.5	80	6.44	0.78
C-2	128.0	237.34	76	6.21	0.78
C-3	189.22	399.24	40	4.14	1.95
C-4	197.8	430.0	28	2.76	1.56
C-5	144.0	266.86	7.20	2.30	0.39
C-6	131.5	257.12	26.40	2.53	0.39
C-7	122.5	340.9	48.00	2.99	0.39
C-8	103.2	170.2	28.80	7.13	0.39
C-9	67.8	84.8	36.80	32.20	0.39
C-10	62.7	60.1	10.0	57.50	0.39
C-11	55.0	71.4	148.0	43.70	0.39
C-12	87.1	92.0	760.0	552.0	7.80
C-13	74.9	115.1	108.0	17.48	0.39
C-14	95.6	170.2	100.0	7.13	0.39
Y-1	165.6	184.0	680.0	1472.0	97.50
Y-2	122.2		324.0	181.70	8.19
Y-3	165.0		272.0	276.0	26.91
Y-4	137.9		84.0	17.02	1.95
Y-5	160.6		800.0	1012.0	70.20
Y-6	149.0		480.0	1012.0	50.70
Y-7	113.9		140.0	25.30	1.56
Y-8	86.2		204.0	71.30	1.56
Y-9	129.6		160.0	25.30	2.34
Y-10	84.1		480.0	506.0	6.24

<u>MUESTRA</u>	<u>TEMPERATURA</u>		<u>CONCENTRACION (PPM)</u>		
	Ca/Na/K	Na/K	CA	NA	K
Y-11	120.5		132.0	36.80	2.34
Y-12	102.5		120.0	14.49	0.78
Y-13	81.3		108.0	36.80	0.78
Y-14	166.3		720.0	874.0	70.20
Y-15	126.97		156.0	9.89	1.17
Y-16	239.1	283.1	264.0	1403.0	276.90

LAS MUESTRAS C-1 A C-8 PERTENECEN AL AREA DE 140 KMS², EN LA CUAL SE DESARROLLAN ACTUALMENTE LOS ESTUDIOS DE DETALLE. LA TEMPERATURA MAS ALTA CALCULADA PARA EL GEOTERMOMETRO Ca/Na/K CORRESPONDE A LA MUESTRA Y-16, PERTENECIENTE A LA FUENTE TERMAL UBICADA A LO LARGO DEL ARROYO GUAYABAL.

FIG. Nº 1

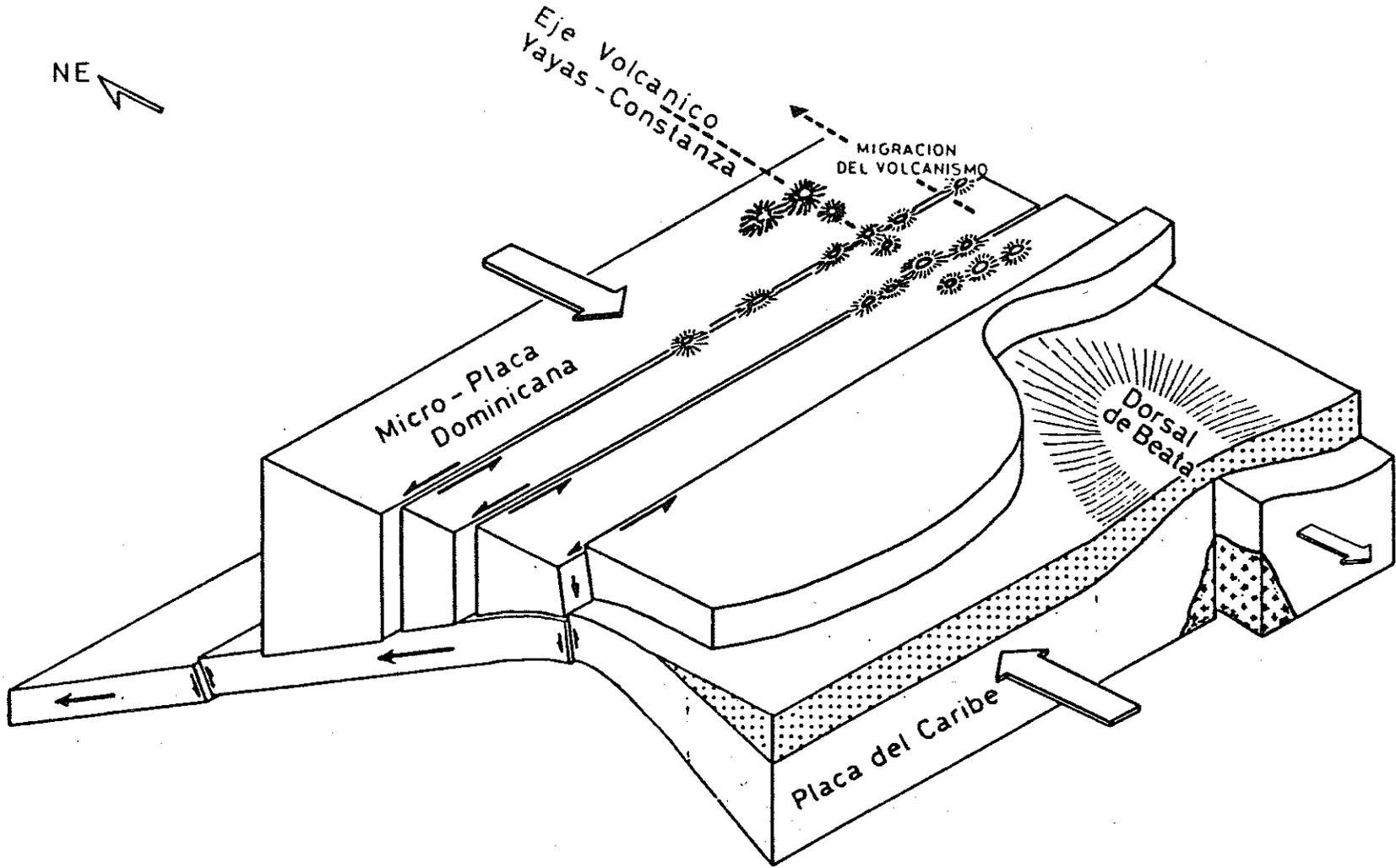


LEYENDA

- Eje de extensión lateral activa
- Eje de contracción lateral activa
- Zona de subducción activa
- Zona de subducción de menor actividad
- Faja de rumbo
- Dirección principal de desplazamiento

ESTUDIO DE PRE-FACIBILIDAD		YAY 1001
MAPA GEODINAMICO DEL CARIBE Y DE LA ISLA HISPANIOLA		
1970	1001	etc

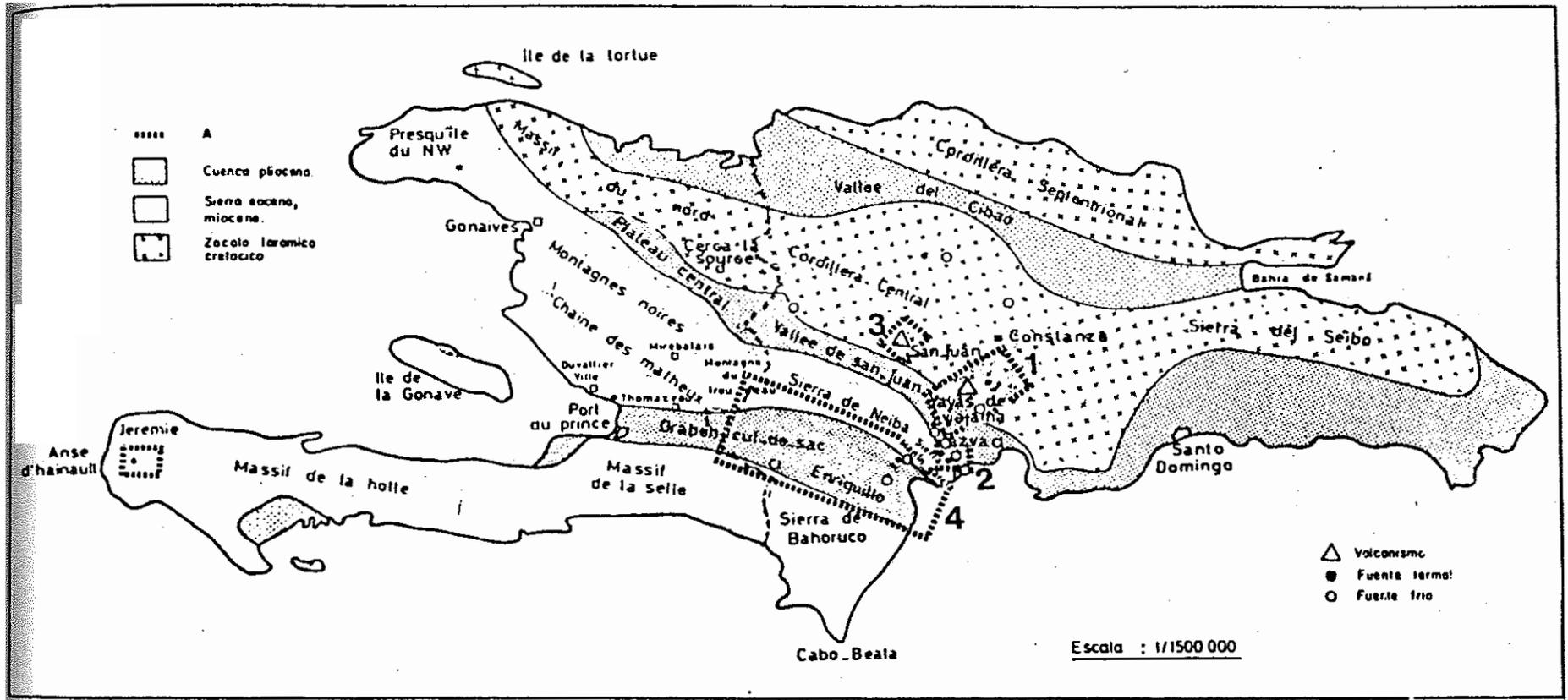
FIG. Nº 2

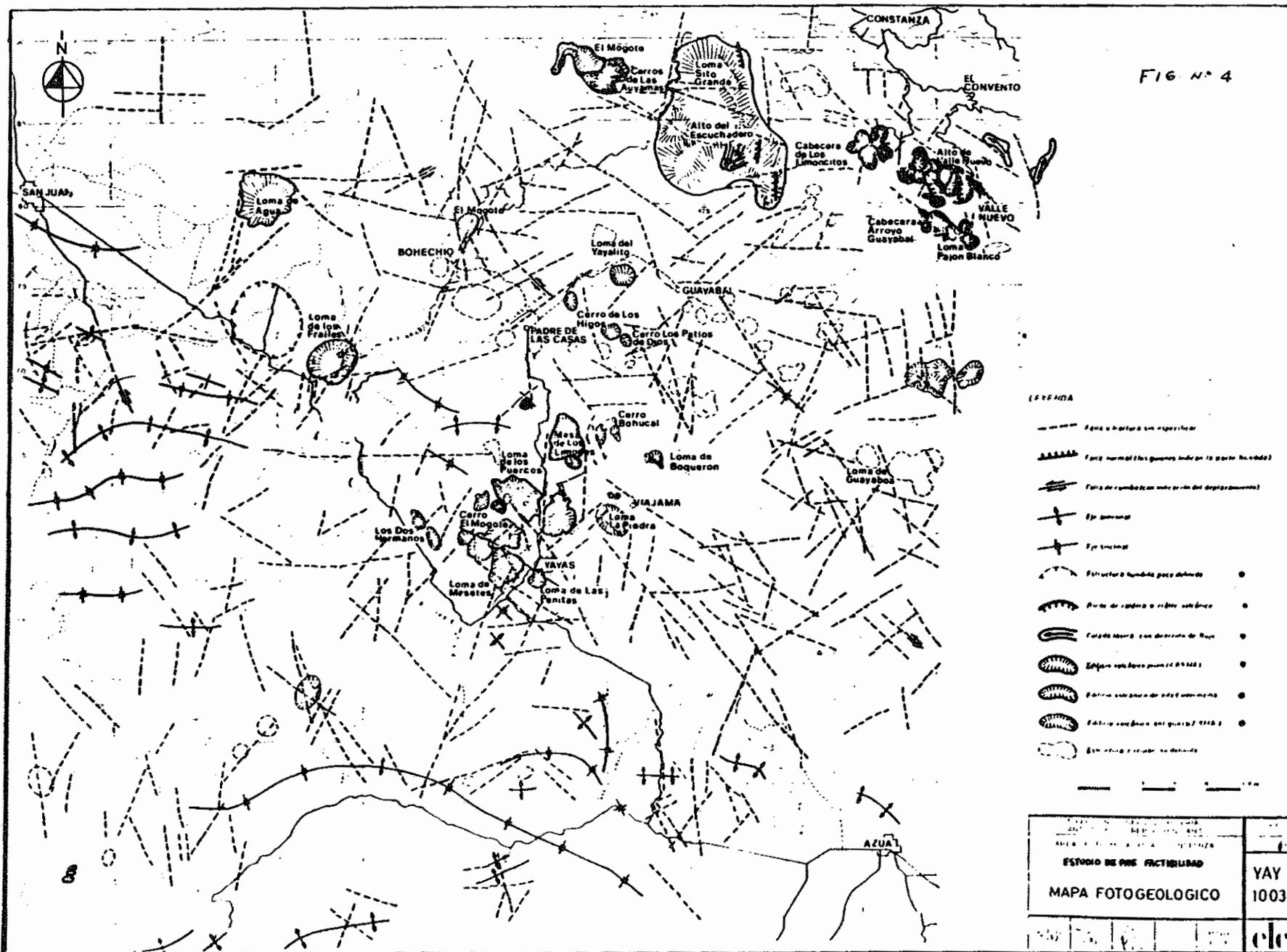


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE SAN CARLOS, GUATEMALA		
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS		
ÁREA GEOTÉCNICA YAYAS - CONSTANZA		
ESTUDIO DE PRE-FACILIDAD		YAY
MODELO GEODINAMICO DE LA ZONA YAYAS CONSTANZA		1007
		etc

FIG:3

► CROQUIS GEOLOGICO Y FISIOGRAFICO DE LA ISLA HISPANIOLA





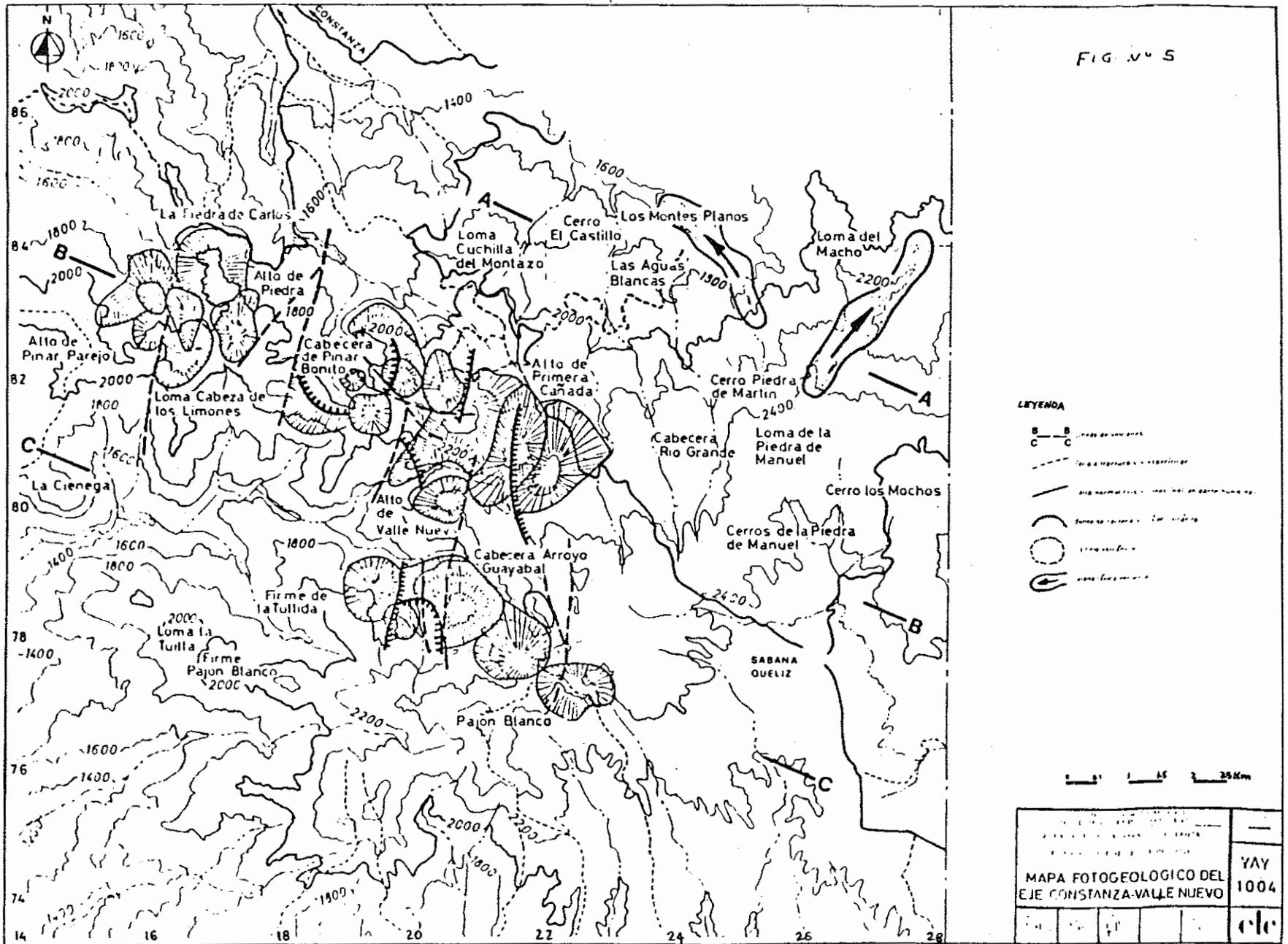
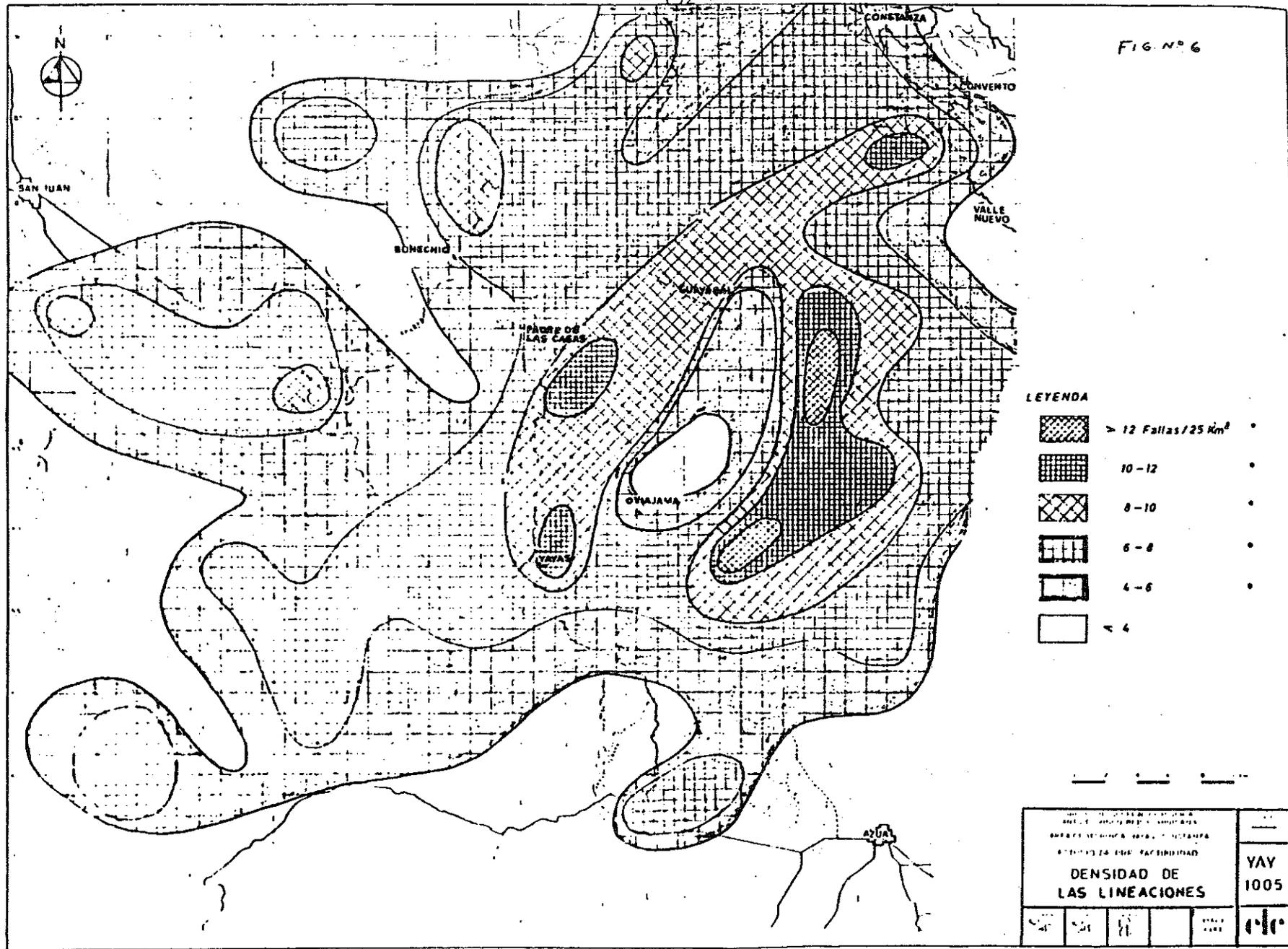


FIG. N° 6



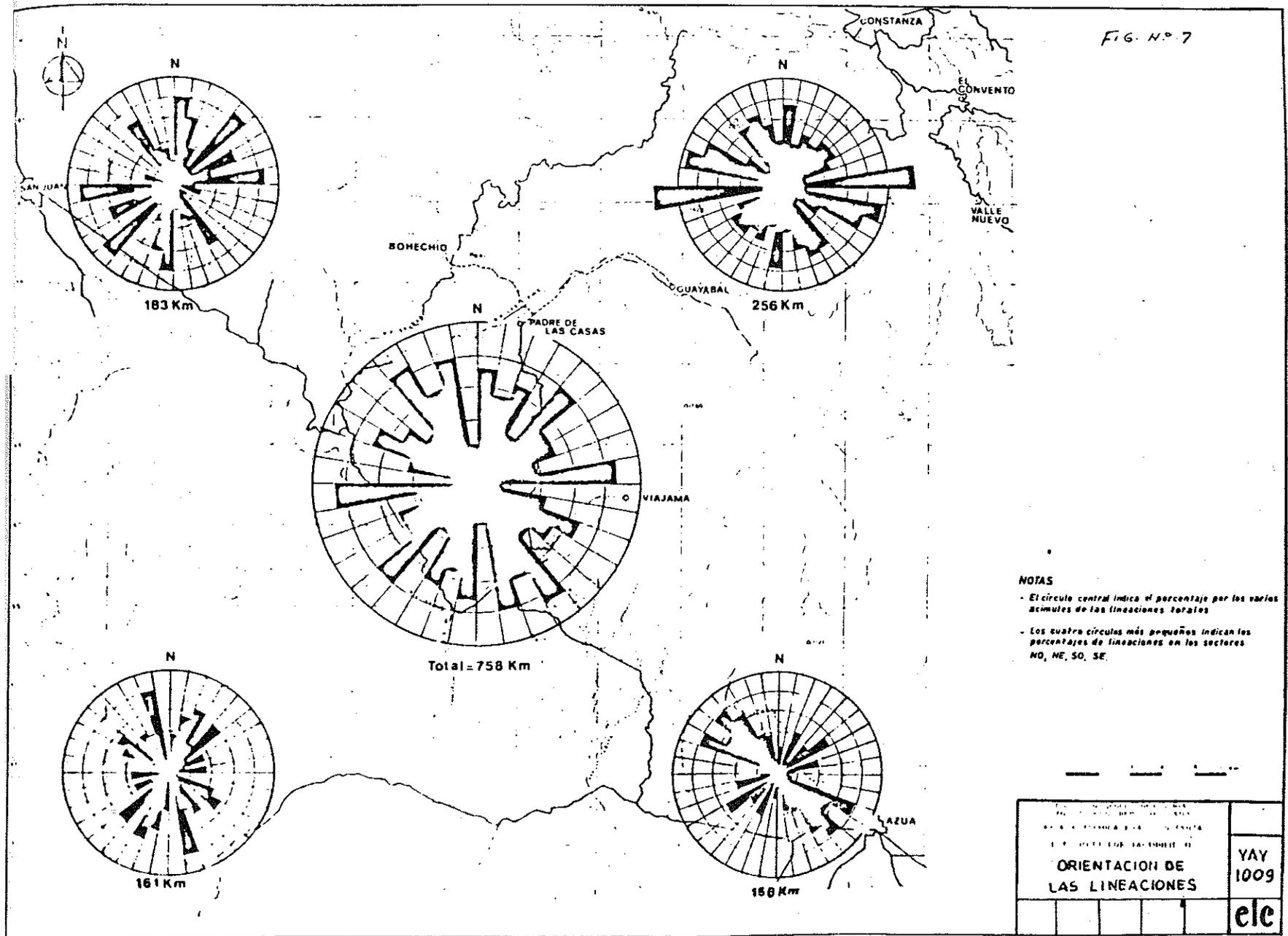
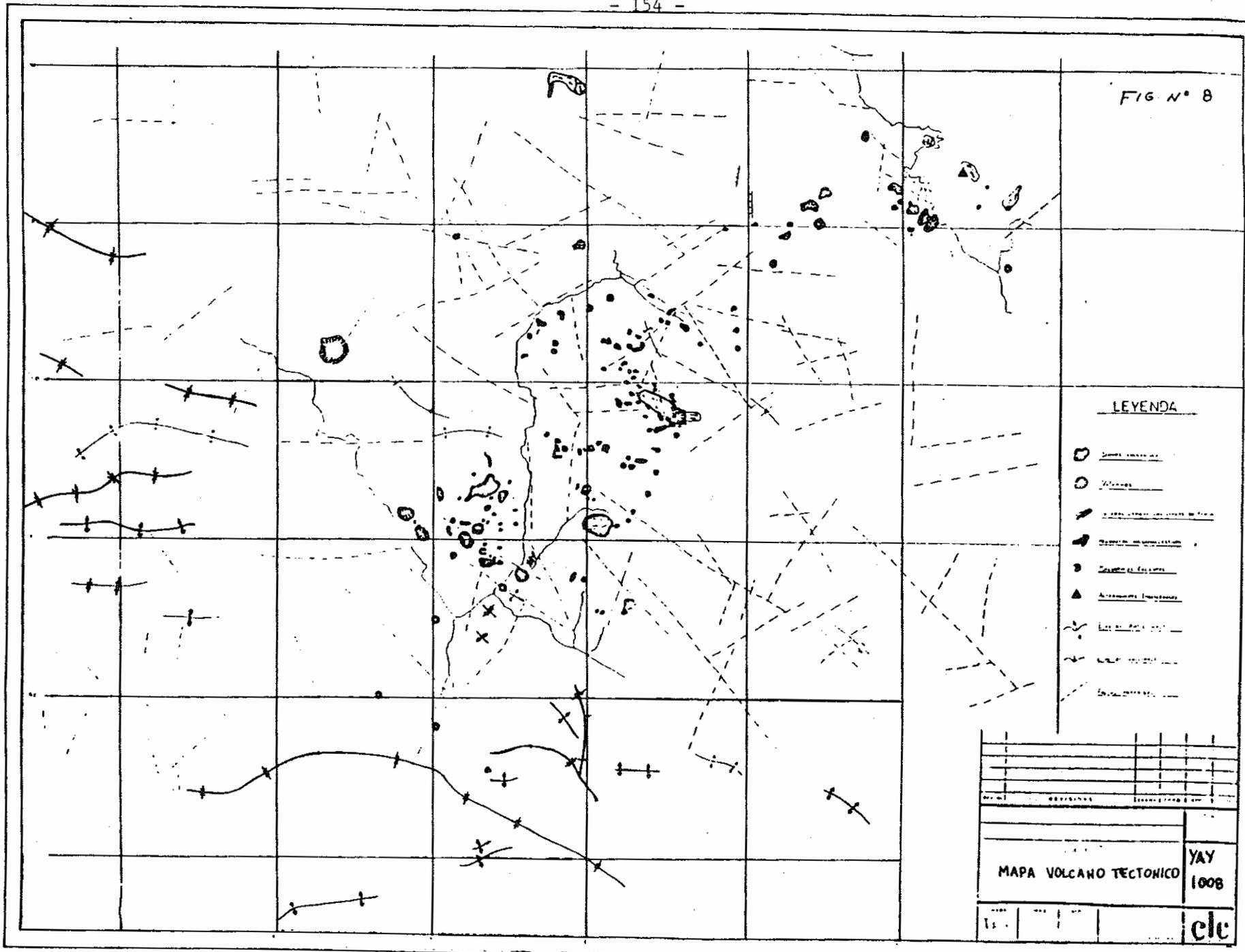


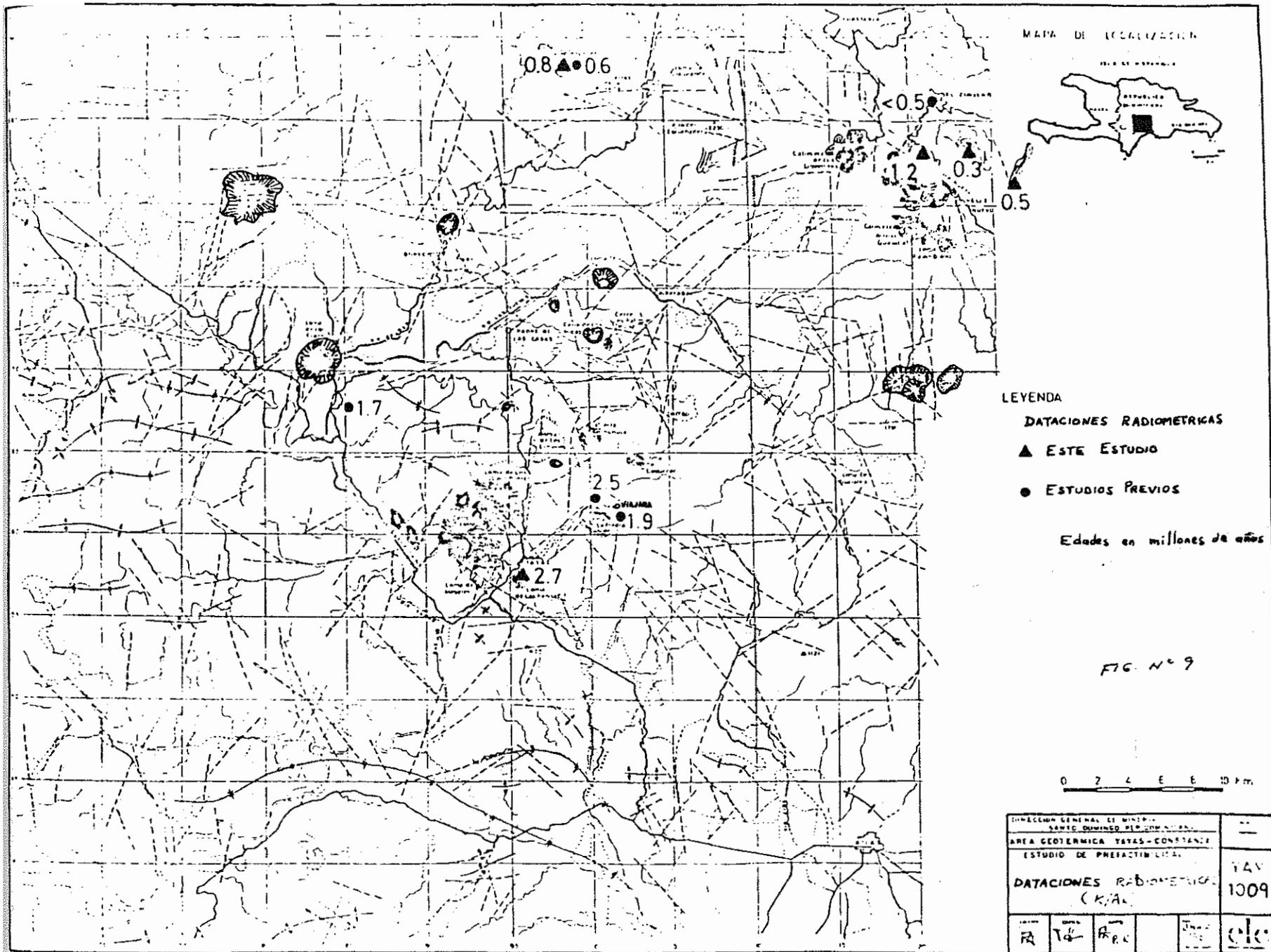
FIG. N° 8

LEYENDA

- Zona volcánica
- Volcanes
- ↗ Dirección de movimiento
- ↖ Dirección de movimiento
- Centro de fuerza
- ▲ Atravesamiento (movimiento)
- ~ Línea de falla
- ~ Línea de fractura
- ~ Línea de deformación

MAPA VOLCANO TECTONICO				YAY 1008
				etc





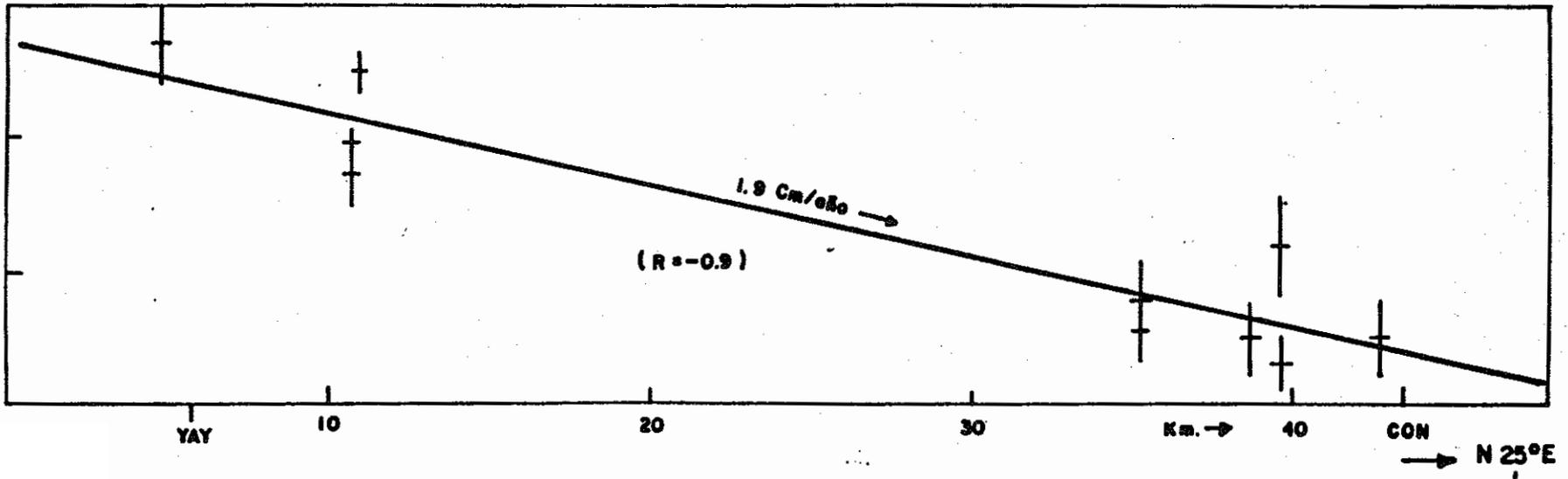
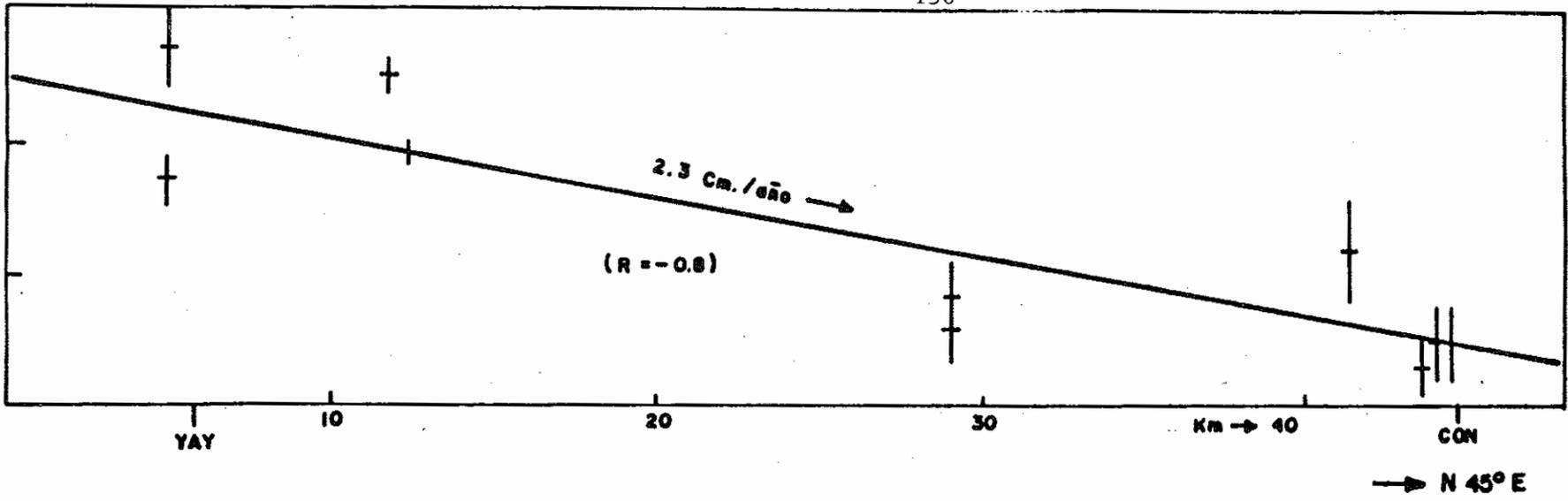
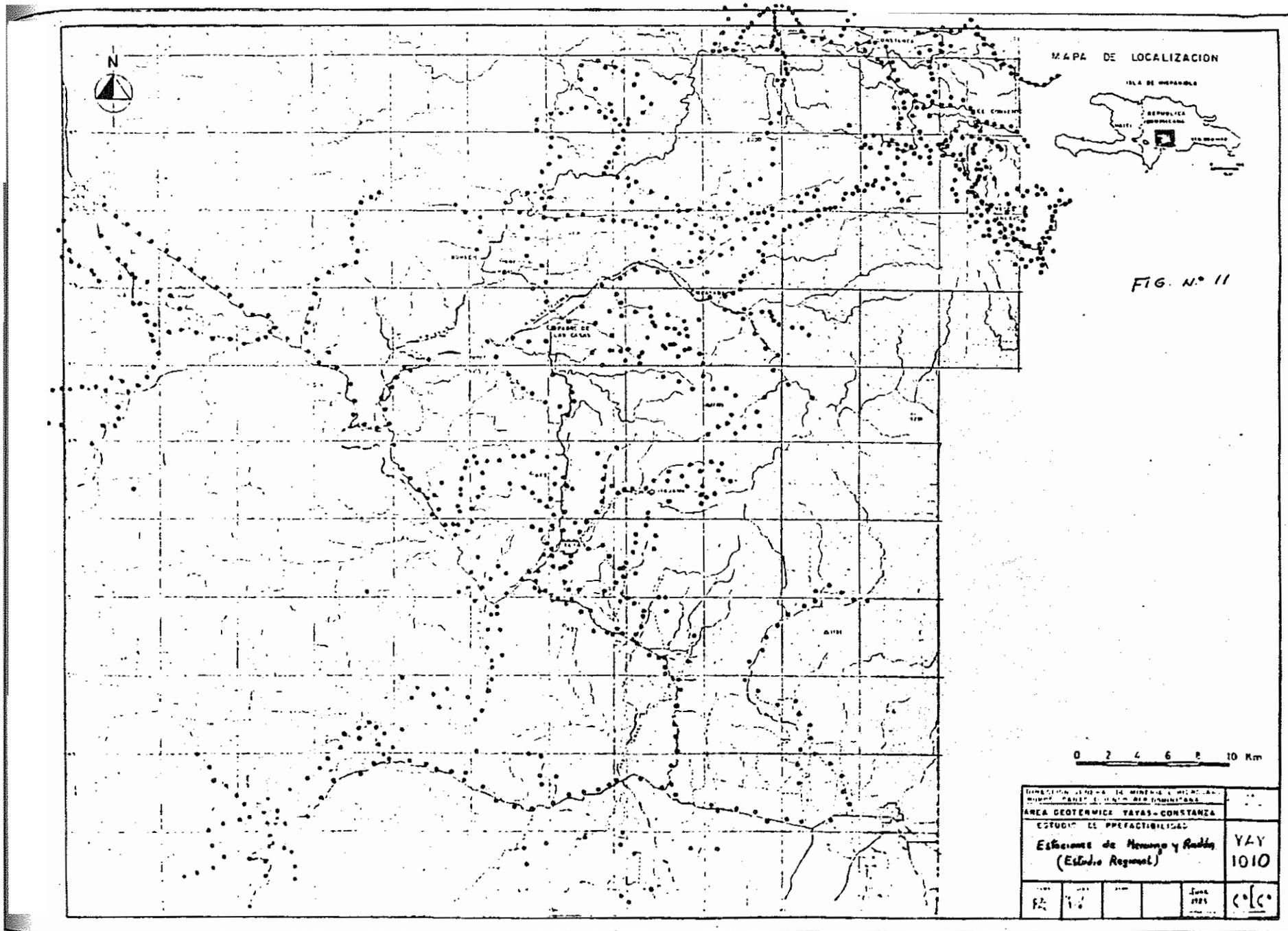
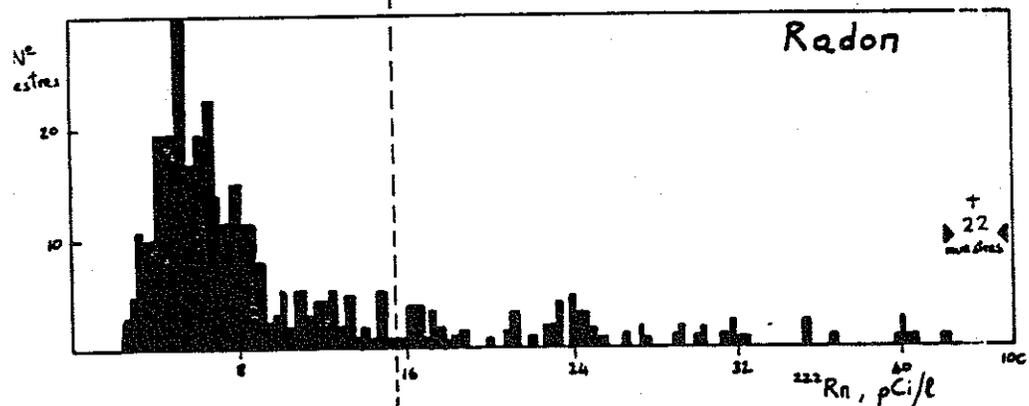
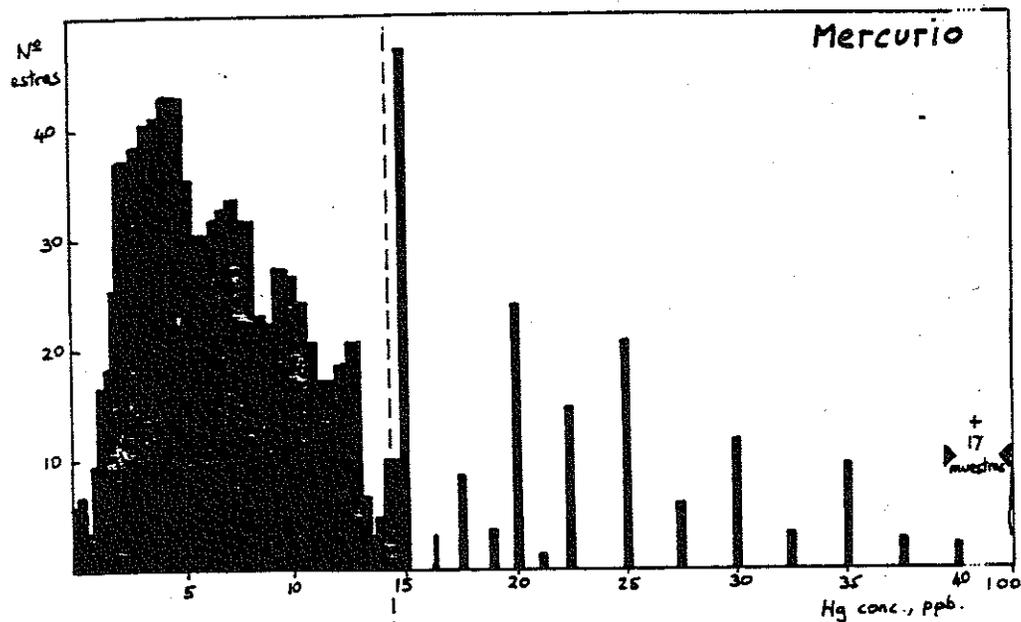


FIG. No. 10





DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LAS CONCENTRACIONES DE RADON Y MERCURIO (Rn/Hg).

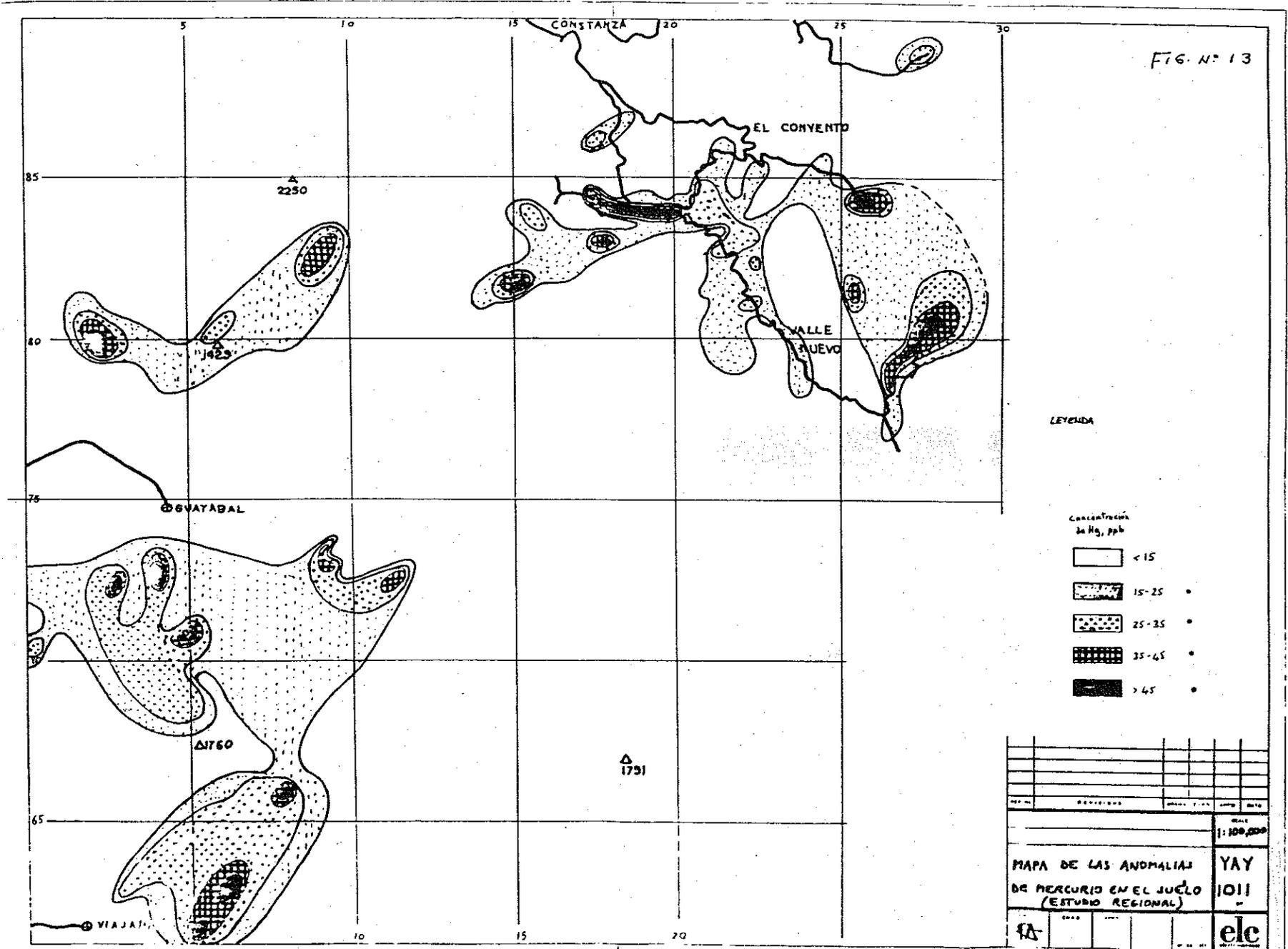
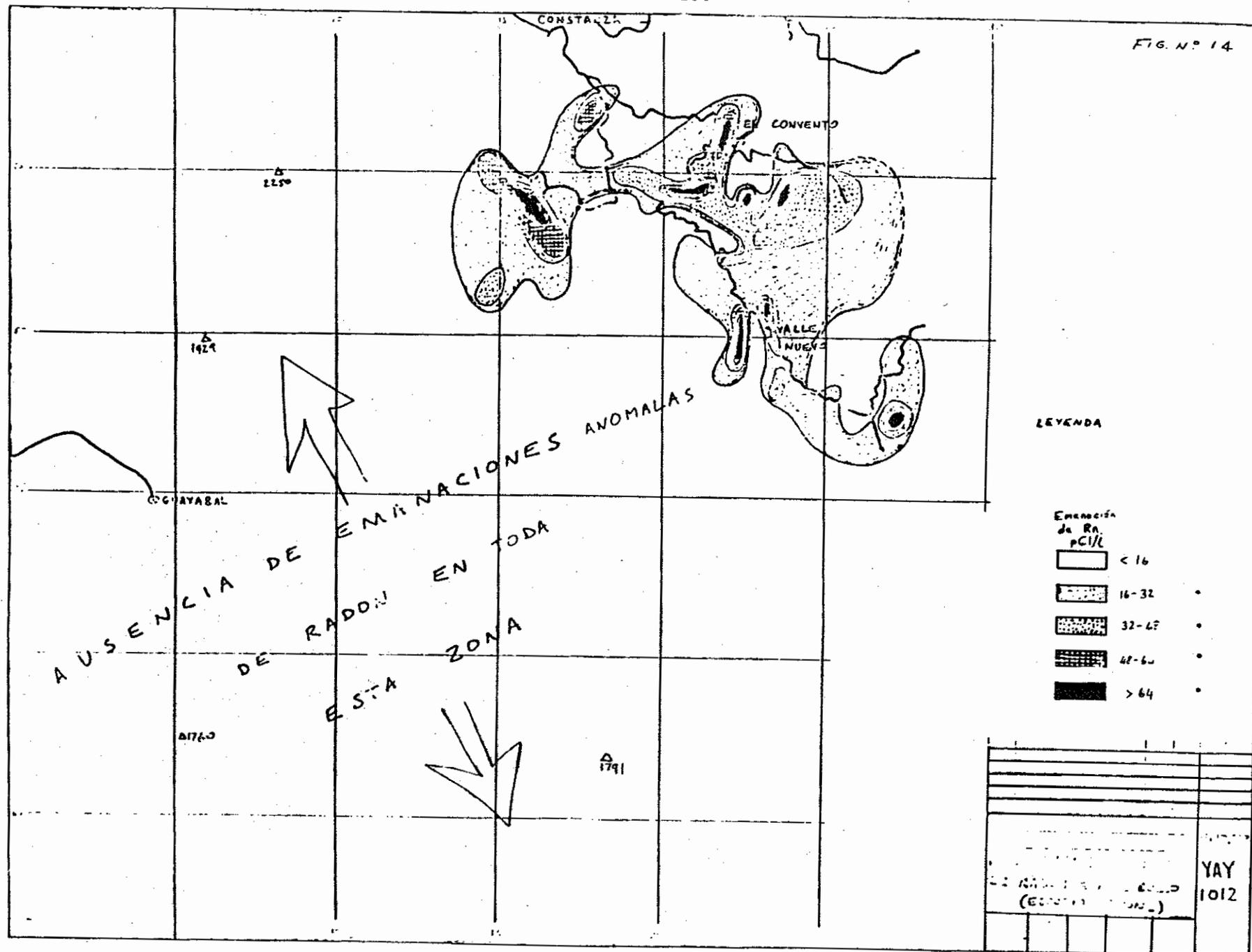


FIG. N° 14



5 LA GEOTERMIA EN VENEZUELA

Ministerio de Energía y Minas
Caracas, Venezuela

1. Introducción

El territorio venezolano, si bien no presenta volcanismo actual, es vecino a regiones volcánicas, como el arco de las Antillas Menores, y se ubica en general, en un margen continental activo o zona de transición entre placas caracterizada por: Alta densidad y alineación de epicentros sísmicos, anomalías gravimétricas alargadas y contrastantes, cuencas sedimentarias recientes a actuales con fuerte subsidencia, áreas de levantamiento y fragmentación en bloques posteriormente inclinados ("tilting"), como producto de la interacción de diferentes trenes de fallas; y por la concentración de numerosas manifestaciones termales, zonas de mineralización y alteración hidrotermal, cuya orientación es coherente con la de los elementos anteriores. Este cuadro es producto de la combinación de grandes zonas de cizallamiento, con esfuerzos comprensivos generalizados y repetidos, descargados en sectores de ruptura complejos y en distensiones localizadas y violentas. Todo ello genera estructuras capaces de servir de vías de penetración, de entrapamiento y aún de sello para los fluidos geotérmicos.

Para la evaluación del potencial geotérmico de Venezuela, se ha subdividido el país en provincias o regiones y sub-regiones.

Provincia Geotérmica Nor-Oriental: Dtto. Geot. El Pilar-Casanay
Dtto. Geot. Barcelona-Cumaná

Provincia Geotérmica Central
Provincia Geotérmica Occidental
Sub-Regiones: Nueva Esparta, Bolívar, Falcón

2. Breve síntesis cronológica

1975 - La empresa CADAFE, en conjunto con la Universidad Central de Venezuela y el Ministerio de Energía y Minas, iniciaron el estudio sistemático de las manifestaciones termales existentes en el país, mediante un grupo de trabajo interinstitucional, que contó entonces con la asesoría de la ENEL - Italia.

1979 - El Ministerio de Energía y Minas (MEM), basado en disposiciones de la Ley Orgánica de la Administración Central, que le reserva la elaboración de políticas y la supervisión de ejecutorias energéticas en Venezuela, reestructuró todas las actividades vinculadas con la Geotermia. En consecuencia, se crea el Comité Nacional Geotérmico, compuesto por el MEM, CADAFE, la UCV y el MARNR (Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables), coordinado por el MEM y asesorado por OLADE.

1980 - Culmina la elaboración y aprobación del Plan Básico para la Evaluación de los Recursos Geotérmicos Nacionales. Se selecciona la Provincia Geotérmica Nor-Oriental como blanco exploratorio inicial, nombrándose una comisión de trabajo con la misión de elaborar un Informe Preliminar, aplicando conceptos de la Metodología de OLADE.

1981 - En el mes de febrero se concluyó el Informe Preliminar para la Evaluación del Potencial Geotérmico de la Provincia Nor-Oriental, el cual representa en opinión de OLADE, el 75% de la Fase de Reconocimiento, el mismo que plantea un programa de actividades (con sus Cronogramas y Presupuestos), a fin de completar esta etapa y ejecutar la siguiente fase de Pre-Factibilidad. Ese

informe abarca: Recopilación y clasificación de la información técnica existente, su análisis y evaluación. - Formulación y presentación de programas técnicos por especialidad. - Homogenización de la cartografía. - Configuración de un esquema geológico regional, con énfasis en mecanismos estructurales y parámetros geotérmicos. - Estudios de tectónica y de la asociación de manifestaciones termales con fallas. - Interpretación geológico-estructural a escala 1:250,000 de imágenes radar. - Estudio hidrogeológico regional e hidroclimatología general, en base a datos existentes.

En esta etapa, se incorporó la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS).

1982 - El MEM, actuando como coordinador de las actividades geotérmicas, presentó a mediados de 1981 y en 1982, el informe mencionado en forma de propuesta concreta para lograr financiamiento, ante las siguientes instituciones: Petróleos de Venezuela, S.A.; FONINVES y CORPORIENTE (Corporación para el Desarrollo de la Región Oriental), así como ante las diversas Gobernaciones de los Estados del Oriente de Venezuela (Sucre, Anzoátegui y Monagas).

Se completó la Fase Reconocimiento de la Provincia Geotérmica Nor-Oriental, mediante esfuerzo conjunto de la UCV y del MEN, desarrollando el primero las labores prospectivas y el segundo brindando asesoría técnica. El financiamiento económico de estos trabajos complementarios fueron proporcionados por FONINVES.

Se discute en este mismo año con CADAPE y el MARNR, el inicio de una parte de las actividades previstas para la Fase de Pre-Factibilidad.

1983 - A principios de este año, se firmó, entre el MEM, la empresa CADAPE y el MARNR, un contrato para la realización de la prime

ra parte de la PreFactibilidad, con financiamiento de los dos primeros organismos, designándose al efecto un Comité Ejecutivo (CADAPE-MEM), un Grupo de Coordinación y Ejecución (CADAPE-MEM-MARNR) y un Jefe del Proyecto Geotérmico (Ing. Virgilio González, del MEM), quedando CADAPE como Administrador.

El financiamiento acordado cubre un 20% de lo requerido para la fase Pre-Factibilidad. Las actividades actualmente en curso abarcan: Geología semi-detallada de sectores de interés en el Distrito El Pilar-Casanay; hidrogeología (hidrogeoquímica) e hidrometeorología (instalación de una red complementaria de estaciones para fines geotérmicos); complementación con fines geotérmicos de laboratorios geoquímicos del MEM; orientación y logística de todas las actividades según requerimientos de la ingeniería geotérmica.

3. Estado actual de las investigaciones

El Plan Nacional Geotérmico y el Proyecto para la Evaluación del Potencial Geotérmico de la Provincia Geotérmica Nor-Oriental está basado esencialmente en la metodología propuesta por la OLADE. Luego de seleccionarse la Provincia Nor-Oriental como blanco más promisorio del desarrollo de la Geotermia, como fuente energética alternativa, se desarrolló la Fase Reconocimiento en la totalidad del área cubierta por esta zona, la cual alcanza los 50.000 km². Como resultado de la fase citada se seleccionaron como áreas prioritarias los distritos geotérmicos de El Pilar-Casanay (área aproximada 2.800 km²) y Barcelona-Cumaná (área aprox. 2.000 km²), en función de la evaluación de la información disponible; comprobaciones en el terreno y factores económico-sociales. Así mismo, se definieron las inversiones y la capacidad técnica necesarias para la evaluación del potencial geotérmico en las áreas seleccionadas, se estudiaron problemas específicos relativos a la fuente probable de calor (datación de rocas ígneas, estudios de la anomalía térmica regional y su relación con la tectónica, etc.), a las

posibilidades de recarga y entrapamiento del reservorio. Igualmente, se determinó un esquema geotérmico preliminar, en función de las condiciones específicas y finalmente se elaboró un programa detallado de exploración,

4. Problemas surgidos, necesidades y recursos humanos disponibles

Los únicos problemas serios surgidos en el esfuerzo por llevar adelante el Plan Nacional de Evaluación de los Recursos Geotérmicos, se relacionan con el manejo administrativo de los fondos asignados, y con la consecución de los recursos financieros para la Fase de Pre-Factibilidad. Las necesidades fundamentales se vinculan actualmente con la falta de un geoquímico experimentado en geotermia y de un tectonista-geotérmico; carencias que en ambos casos deberían ser cubiertas por asesoría externa especializada.

Los recursos humanos disponibles son: un ingeniero petrolero especializado en geotermia; el cual actúa como Jefe del Proyecto; un geólogo estructural; un geólogo asesor, experto en la geología regional; un geólogo asesor, bioestratígrafo; un geólogo de campo, con preparación en tectónica y sensores remotos, que actualmente se especializa en geotermia en el curso de la J.I.C.A. - Japón; un geólogo de campo con experiencia; un geoquímico especializado en los cursos de Italia y El Salvador sobre Geotermia; un geoquímico con cursos de Geotermia en México; dos geoquímicos de campo, uno de ellos orientado hacia computación; un geólogo - PhD, con experiencia en hidrogeología geotérmica; un hidrogeólogo; dos o tres ingenieros hidrólogos, sin experiencia en geotermia; dos geofísicos experimentados, sin orientación geotérmica; un geofísico con preparación geotérmica en Japón y en Italia; y un geólogo en iguales condiciones, sin experiencia de campo. No obstante, esta aparente abundancia, oculta el hecho que del total enumerado, sólo los dos primeros profesionales se ocupan de la Geotermia a

tiempo completo,

5. Programas previstos

Para 1984 (o para el bienio 1984-1985), se estima completar la fase Pre-Factibilidad, concretando su segunda parte, que abarcará las siguientes actividades: Estudios geológicos complementarios regionales, de semidetalle y de detalle; geología estructural orientada hacia neotectónica, con elementos de análisis sísmológico; hidrología e hidrogeología complementaria, incluyendo completar una red hidroclimática orientada hacia geotermia; prospección geofísica, mediante la aplicación de los métodos gravimétrico, magnético y eléctrico (resistividad) y re-interpretación de datos aeromagnéticos regionales; geoquímica, (muestreo y análisis complementario de aguas, gases e isótopos; procesamiento computarizado e interpretación de resultados; topografía de apoyo en sectores de mayor interés; orientación de todas las actividades según requerimientos de la ingeniería geotérmica, culminando con la elaboración del modelo geotérmico correspondiente y la selección de sitios de perforación exploratoria.

6. Incidencia estimada de la geotermia dentro del sector energía en Venezuela

El Sexto Plan de la Nación prevé entre sus objetivos, "incorporar progresivamente a la estructura energética del país, las fuentes de energía nuevas o renovables, de manera que el suministro energético sea más equilibrado, flexible o descentralizado", "con el objeto de satisfacer necesidades específicas en aquellas áreas donde las fuentes tradicionales no se justifiquen por razones de índole geográfica, técnica y económica", promoviendo "el aprovechamiento integral de los recursos naturales renovables" y "el ahorro y mejor utilización, a largo plazo, de los energéticos fósiles".

Particularmente, dada la situación actual del mercado internacional del petróleo, adquieren importancia tanto el ahorro en el consumo de energía (o la estabilización de la tasa de crecimiento del mismo) y como la incorporación de otras fuentes al balance energético nacional, permitiéndo disponer de mayores saldos exportables de hidrocarburos, sin aumentar el volumen total de producción.

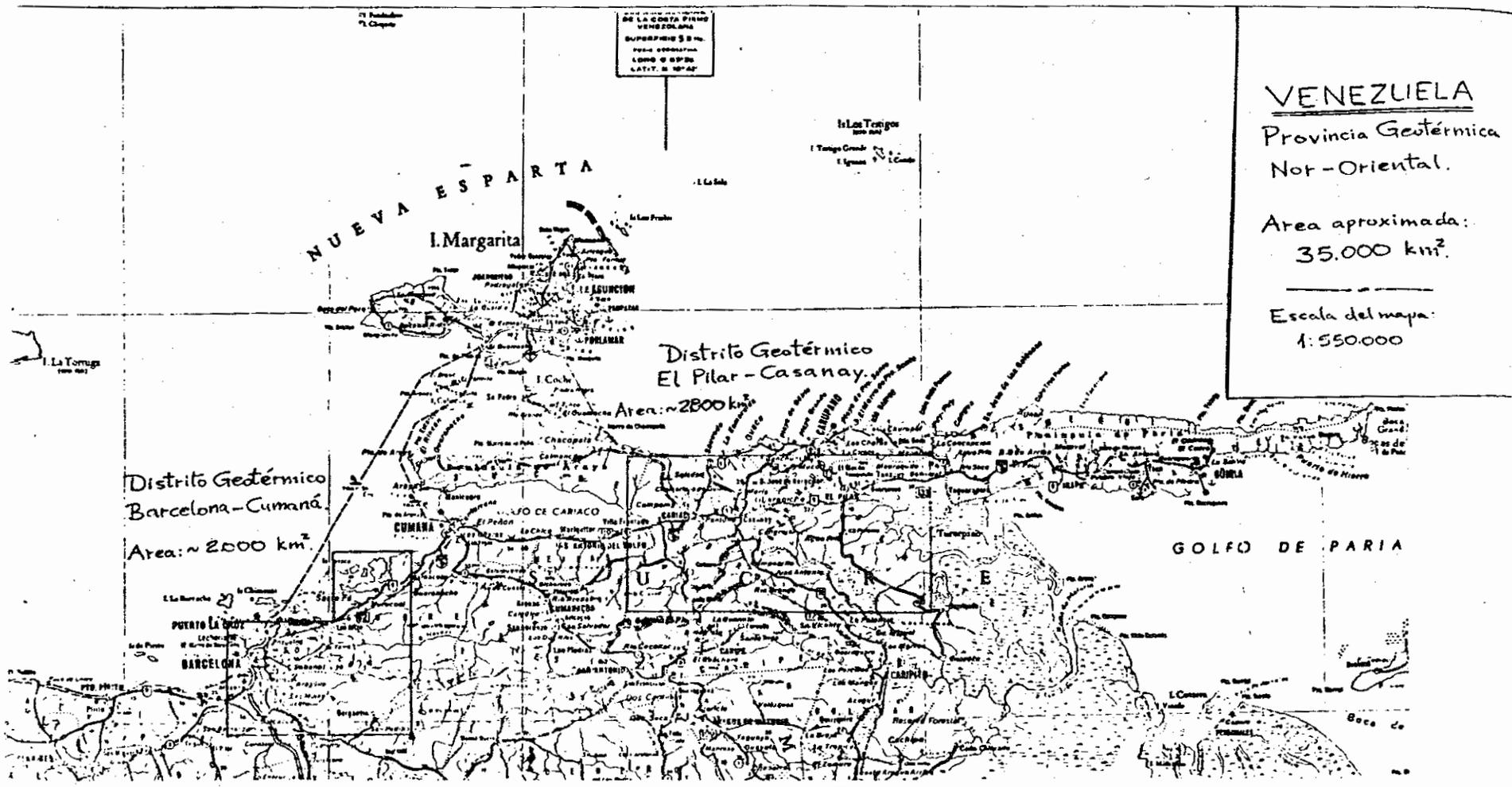
En este contexto, adquieren relevancia fuentes de energía renovables, limpias y baratas, capaces de constituir un aporte significativo al balance energético. Estas son, en primer lugar, la hidroelectricidad y la geotermoelectricidad, las que permiten, a la vez, importantes aprovechamientos paralelos, como el riego y regulación de aguas por la primera, y los muy variados usos no eléctricos que implica el uso integral de la segunda.

Se considera* que Venezuela posee un potencial hidroeléctrico aprovechable de unos 36,000 MWe (sin contar con el aporte de las pequeñas caídas de agua), de los cuales se utilizan** en la actualidad menos de 10,000 MWe.

Se estima que hacia 1986, esa potencialidad llegua a cubrir hasta un 70-80% de la demanda eléctrica total. Dado que la diferencia será suplida esencialmente por termoelectricidad, resulta comprensible la importancia de la Geotermia como un aporte menor, pero rentable, que implicaría una reducción significativa del uso de combustibles fósiles y su consecuente beneficio económico.

* COPLANARH, 1969

** Aprovechamiento ya construídos, en construcción o con proyectos definidos.



VENEZUELA
Provincia Geotérmica
Nor-Oriental.

Area aproximada:
35.000 km².

Escala del mapa:
1:550.000

Fig. No. 1

3. TRABAJOS TECNICOS PRESENTADOS POR LOS CONFERENCISTAS

3.1.1. GEOVULCANOLOGIA EN LA EXPLORACION GEOTERMICA - PROGRESOS ALCANZADOS

Conferencia dictada por:
Prof. Franco Barberi

INTRODUCCION

El objetivo de este seminario una vez analizado el aporte de cada una de las disciplinas relacionadas a la geotermia, es tomar en cuenta los progresos realizados en los últimos años, a fin de que estas nuevas ideas contribuyan a la actualización de la metodología. El propósito de esta conferencia es destacar los avances, que la geovulcanología ha logrado en estos últimos 5 años, en sectores donde tiene inmediata aplicación como es la exploración geotérmica. Al final de esta exposición se presentarán sugerencias dirigidas a la actualización de la metodología OLADE. Se desea destacar que no se considera a la geovulcanología como la única disciplina que se debe aplicar durante la ejecución de los estudios de proyectos geotérmicos, sino que, los resultados finales estarán basados en la integración con los resultados de otras disciplinas.

FUENTE DE CALOR Y RESERVORIOS GEOTERMICOS

Los progresos logrados en la vulcanología en los últimos años, tomando como referencia los cinco años que nos separan del seminario que estableció la metodología OLADE, básicamente se refieren a dos aspectos: la fuente de calor y la presencia de reservorios geotérmicos, es decir, los dos objetivos principales de la exploración geotérmica. La vulcanología ha progresado mucho, estando en condiciones favorables de dar datos cuantitativos en cuanto a fuente de calor se refiere y también indicar si en el subsuelo de una determinada región existe permeabilidad

y reservorio geotérmico, además de señalar, cual es la temperatura en el interior de estos reservorios.

a. La fuente de calor

La metodología utiliza cualitativamente la edad y los volúmenes de los productos evolucionados (dacitas, riocacitas, riolitas). Básicamente utiliza un método que es muy similar al empleado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos. Según un diagrama cualitativo (Figura 1), se puede realizar una estimación de la anomalía térmica de una región, la misma que resulta más elevada cuanto mayores sean los volúmenes de los productos ácidos y más reciente la edad de los mismos.

La filosofía de este método se basa en el hecho de que existen principalmente dos posibles orígenes de los productos volcánicos ácidos. El primero que se debe a una diferenciación de magmas básicos, tales como andesitas o basaltos y el segundo relacionado con la fusión parcial de rocas en el interior de la corteza continental, mediante el proceso denominado antexis. Es importante observar que en ambos casos, la edad de los productos ácidos más importante sea, en una primera aproximación, menor que 100.000 años; lo cual representará seguramente una anomalía térmica superficial en la corteza. El método se ha revelado muy útil, pero tiene claramente un carácter cualitativo, que sin embargo, permite comparar la magnitud de las anomalías térmicas. El progreso realizado en estos últimos años, consiste en la posibilidad de realizar una cuantificación de la fuente de calor; es decir, convertir el proceso cualitativo en cuantitativo. Para esto, el problema consiste en intentar elaborar un modelo de cámara magnética, lo cual es en realidad, el caso para la mayoría de los sistemas geotérmicos. Sin embargo, esta no es la única condición que deben satisfacer los sistemas de alta entalpía, puesto que, deben estar directamente relacionados con la presencia, en la parte superficial de la corteza terrestre, con un cuerpo de magma que convencionalmente llamamos cámara magnética. Esta constituye, la zona de alimentación de los grandes volcanes centrales, y frecuentemente, pero no siempre, está asociada a estructuras caldéricas. El modelo general

de todas las cámaras magnéticas es el siguiente: un magma básico asciende desde la zona profunda donde se origina y se emplaza en el interior de la parte superficial de la corteza terrestre; ahí se enfría progresivamente, produciendo fluidos diferenciados que se acumulan gradualmente, ubicándose los más densos en la parte inferior y los de baja densidad en el techo de la cámara. Este proceso de enfriamiento ocasiona una transferencia de calor a las rocas encajantes; es decir, que produce una anomalía térmica superficial, cuya determinación es el objetivo de la investigación geotérmica. Es claro que si se logra mediante investigaciones superficiales de bajo costo, una cuantificación de sus parámetros fundamentales se obtendría un gran progreso en el conocimiento del sistema geotérmico.

Cuantificar una cámara magnética significa determinar su volumen, edad, profundidad, temperatura y, particularmente, conocer la temperatura de emplazamiento del magma básico y la temperatura de la última erupción. La profundidad puede obtenerse estimando la presión del sistema. Para estimar el volumen se elabora un modelo, el cual tiene que ser analizado para cada caso en particular, considerando que los productos ácidos eruptados en un determinado volcán, son producto del fraccionamiento a partir de un magma básico alojado en el interior de la cámara. Para esto se requiere realizar estudios petrológicos y geoquímicos de las rocas. Una vez que se conoce la existencia de un fraccionamiento y el volumen de la cámara, podrá ser estimado, en principio, relacionándolo al cálculo del volumen de los productos eruptados. Por ejemplo: estimar los productos ácidos de la más reciente e importante erupción del volcán, luego evaluar el grado de fraccionamiento, es decir, cual es el porcentaje del sistema inicial básico que está representado en los productos eruptados.

La temperatura la podemos estimar ya sea a través de mediciones experimentales, como por ejemplo, determinando la temperatura de cristalización de las fases sólidas y la temperatura de equilibrio de las inclusiones de vidrio, que son muy frecuentes en los productos volcánicos. La otra posibilidad que también es muy sencilla, porque no requiere

de trabajo experimental alguno, es la estimación de la temperatura a través de la reconstrucción, con apropiados diagramas petrogenéticos, del equilibrio de cristalización sólido-líquido. Posteriormente vamos a ver algunos ejemplos sobre la estimación de la profundidad de la cámara, es decir, la presión de cristalización que puede ser convertida en profundidad. Normalmente esto es lo más difícil, ya que no siempre se pueden obtener estos datos dependiendo caso por caso, de la particularidad del sistema volcánico estudiado, aunque la técnica, de todas maneras, es la reconstrucción de la presión a través de la historia del proceso de cristalización. Eduardo Almeida (1983) ha descrito las características geológicas esenciales de la cámara magnética de complejo volcánico "Chiles-Cerro Negro", localizado en la frontera Colombia-Ecuador. Se toma esta área como ejemplo para explicar la aplicación de estos métodos.

Los estudios vulcanológicos realizados por INECEL-OLADE, han indicado claramente que el sistema Chiles-Cerro Negro está relacionado con una falla transversal de la cadena andina. El estudio petrológico ha permitido hipotetizar la existencia de una sola cámara magnética, que ha alimentado a los dos volcanes a lo largo del tiempo y además ha permitido cuantificar esta fuente de calor. Los estudios petrológicos son fundamentales en este tipo de técnicas evaluativas, sin embargo, en el presente tratado se hará una breve intervención sobre esta fase. En la figura 2, se observa la distribución de algunos elementos químicos como el aluminio, magnesio, calcio en función de la sílice. Los diagramas de este tipo demuestran la existencia de un fenómeno de evolución progresiva en la composición química de los magmas; se observa muy bien que los dos volcanes, representados con símbolos diferentes, pertenecen claramente a la misma serie; no existe ninguna diferencia entre los dos, permitiendo entonces resumir que han sido generados por un mismo proceso de diferenciación magnética. El punto extremo de la derecha es muy importante, pues representa la composición química del vidrio que ha sido separado mecánicamente de la roca más evolucionada, la cual fue eruptada por los dos volcanes. Estudiando en detalle la petrología y la química de esta roca, se puede establecer primero, que efectivamente, todos

estos productos son generados por un proceso de diferenciación en el interior de una cámara magnética. Luego se puede intentar estimar el grado de fraccionamiento, tomando en cuenta los productos más evolucionados y el volumen de los mismos. Finalmente, conociendo la naturaleza del proceso de fraccionamiento que los ha producido, calcular el volumen inicial de la cámara magnética.

Para la estimación de la presión, se utiliza la figura 3, en donde está representado el vidrio separado de las rocas más evolucionadas de los dos volcanes. Las curvas son líneas de presión que separan el campo de cristalización de dos diferentes fases sólidas, es decir que el campo de cristalización de la fase sólida está controlado por la presión. En el caso tratado se puede decir que la presión es muy baja, probablemente alrededor de 500 bares, esto significa que la profundidad de la cámara es también somera. Se puede estimar que el techo de la misma se encuentra a dos kilómetros de profundidad. La temperatura también puede estimarse utilizando el mismo tipo de diagrama, en donde están trazadas las isotermas, de tal manera que teniendo la composición del líquido magnético y la naturaleza de las fases, se puede estimar la temperatura de cristalización sin ninguna dificultad. El volumen de los productos ácidos eruptados, ha sido estimado por los geólogos de INECCEL, en dos kilómetros cúbicos de líquido magnético equivalente. El grado de fraccionamiento ha sido estimado en un 27%, lo cual nos permite calcular el volumen inicial de la cámara magnética en 5.5 kilómetros cúbicos. La reconstrucción de los procesos de cristalización nos permite estimar la temperatura inicial del magma básico en 1.200°C aproximadamente y cerca de 900°C la temperatura de la cámara en el momento de la erupción de los productos diferenciados. En resumen se ha estimado que la profundidad del techo de la cámara magnética se localiza dos kilómetros y que la presión de ésta es de 500 bares. Se determinó mediante métodos radiométricos que la edad de las últimas erupciones es de alrededor de 30.000 años y que la temperatura media anual en la superficie de la zona es de 8°C. Falta establecer cual es la forma de la cámara para poder utilizar estos datos en el establecimiento de un modelo térmico. En el caso específico del Chiles-Cerro Negro, se considera que

los dos volcanes son alimentados a través de una fractura común y por una misma cámara magnética; por lo tanto, conociendo la geología del área es lógico asumir, que la forma de la cámara es alargada. En resumen, se estima que la cámara tiene 3 kilómetros de largo, un kilómetro de ancho y una altura de dos kilómetros. Estos datos contribuyen a intentar establecer un modelo térmico conductivo, asumiendo que la transferencia de calor se realice solo por conducción térmica. Para esto también es necesario conocer la conductividad térmica de las rocas que separan el techo de la cámara de la superficie y la temperatura del techo de la cámara, con lo que ya se puede elaborar un modelo de transferencia conductiva de calor. Normalmente, la conductividad térmica de las rocas es desconocida, pero tomando en cuenta las propiedades físicas de las rocas volcánicas o el tipo de rocas que en cada caso forman el sistema, se puede asumir valores más reales para cada situación.

Un problema importante en la elaboración de un modelo térmico, es estimar cual era la temperatura de las rocas encajantes antes del emplazamiento del magma. En casi toda la región andina y en la generalidad de casi todas las áreas volcánicas, los magmas recientes o actuales están emplazados en el interior de formaciones que han sido afectadas por actividades volcánicas desde hace varios millones de años; entonces, la cámara magnética es una fuente de calor que se localiza en el interior de un volumen de roca calentada por una actividad volcánica previa. Por lo tanto, resulta difícil en la actualidad estimar cual era el gradiente geotérmico o el flujo de calor antes del emplazamiento en cámara. Tal situación se puede resolver mediante la toma de medidas de flujo de calor o de gradiente en zonas con vulcanismo inactivo. Asumiendo esta práctica, se podrían elaborar varios modelos, con diferentes parámetros de flujo gradiente. Una práctica lógica es asumir un gradiente que sea equivalente al doble del gradiente normal, o sea aproximadamente igual a 55°C por kilómetro.

A continuación se analizan los resultados encontrados en el sistema Chiles-Cerro Negro, base de la presente exposición. La figura 4 representa

un modelo conductivo obtenido una sección paralela a la fractura de alimentación de los volcanes, en donde se grafican las dimensiones máximas de la cámara magnética y se reconstruyen las isotermas del sistema. Se observa que los resultados son muy interesantes, naturalmente por el hecho de que los datos indican la presencia de una cámara muy somera. Se hipotetiza que después de 30.000 años no han habido nuevas inyecciones de magma profundo y que por lo tanto, el techo de la cámara tendría una temperatura de 500°C y de 700°C en la parte interior de ella. Esto indica también, que a un kilómetro de profundidad se localizan temperaturas que son de interés geotérmico para alta entalpía.

La figura 5, es exactamente el mismo modelo, pero realizado en una sección transversal a la fractura de alimentación, en la cual se observa la dimensión más estrecha de la cámara magnética y también la distribución de temperaturas. Estos modelos indican que en subsuelo de esta zona existe una anomalía térmica importante.

Los dos modelos dados pueden ser modificados introduciendo el parámetro de convección, esta es la parte más difícil, porque no se tiene algún dato directo del subsuelo. Pero pueden hacerse algunas consideraciones interesantes, la primera es que el modelo conductivo permita calcular el gradiente térmico actual de la zona con lo cual se establecerá las condiciones mínimas para el sistema convectivo, es decir por ejemplo, se puede estimar cual es el espesor mínimo necesario de un nivel permeable, para que en el interior de este exista un sistema convectivo. Estos datos no son cuantitativos, pero permiten estimar la probable existencia de un nivel convectivo, es decir de un reservorio geotérmico. Se pueden hacer más deducciones, si los datos geológicos, hidrogeológicos, geoquímicos, geofísicos indican o sugieren la probable existencia de niveles de mayor permeabilidad en profundidad, pudiendo intentar en dicho caso, una modelización de la convección en interior de estos niveles. Recordando lo expresado sobre la geología de la zona tomada como ejemplo: existencia de un basamento impermeable, sobre el que sobreyace una serie volcánica de edad pliocénica, la cual contiene varios flujos lávicos, se deduce la posi-

bilidad de localizar niveles productivos en el interior de estos últimos, siempre que por efectos de fracturamiento tengan permeabilidad secundaria adecuada. En base a la estratigrafía se pueden estimar los espesores y la profundidad de estos niveles permeables. Por ejemplo, parece bastante lógico asumir que en el subsuelo de Chiles-Cerro Negro, la formación permeable tiene un espesor promedio de 500 a 600 metros. Si se tiene estos datos, se puede intentar convertir el modelo conductivo en uno convectivo. Aparece entonces en el techo de la cámara, una zona impermeable en donde hay transferencia conductiva de calor, luego una zona permeable con convección térmica y finalmente la capa sello, es decir otro volumen de rocas impermeables. Después de haber intentado varios cálculos, se llegó a la conclusión de que el sistema más sencillo de representar la convección, es trasladando la temperatura de la base hasta el techo del nivel donde la convección es eficaz o sea que, la transferencia de calor por convección es mucho más eficaz que por conducción.

Lo anteriormente expuesto, constituye un ejemplo del trabajo que puede ser realizado en cuanto a la cuantificación de la fuente de calor; comparado con los esquemas cualitativos ilustrados en la introducción de esta conferencia, los progresos logrados son notables.

b- El Reservorio

Se discute en este punto, la participación de la vulcanología en la determinación de reservorios geotérmicos. El problema consiste en definir, a partir del estudio de los productos emitidos por un volcán, si existe en el subsuelo de la estructura volcánica, un acuífero profundo y su posible temperatura. La investigación básicamente consiste en estudiar, cuales son los procesos que ocurren cuando el magma que sube desde la parte profunda de la corteza intercepta una zona que contiene gran cantidad de agua. Es decir, el problema consiste en el estudio de los fenómenos de interacción magma-agua, o lo que se llama en vulcanología, el estudio del hidromagnetismo o freato-magnetismo. Para que estos estudios tengan validez en la exploración geotérmica, en la práctica es necesario: primero reconocer estos tipos de productos y, se-

gundo, estar en capacidad de distinguir entre una interacción del magma con agua superficial, con agua subterránea fría y con agua termal profunda. Otro parámetro que es posible determinar es la temperatura del agua en los reservorios geotérmicos. Vale la pena destacar que estos datos tienen utilidad práctica, si los productos volcánicos analizados son jóvenes. Se tendrá de todas maneras que evaluar en cada caso, si las condiciones hidrogeológicas que existían al momento de la erupción, persisten hasta el momento actual o éstas han sufrido cambios sustanciales.

Los productos hidromagnéticos son muy característicos y una vez se tenga un poco de experiencia, son muy fáciles de reconocer en el campo. Sin embargo, en realidad, las particularidades del fenómeno de la interacción magma-agua son muy complicadas, debido a la gran cantidad de casos que se presentan. Por ejemplo, cuando la interacción se realiza con agua superficial, como sucede en una laguna cratérica o una interacción con agua profunda, como es el caso de los acuíferos fríos o calientes. Los volúmenes de agua involucrados en el proceso pueden ser importantes o escasos, además hay que considerar el nivel de interrupción del magma, el cual puede ser superficial o profundo. Finalmente hay casos muy frecuentes en el cual, el acuífero se encuentra en cercanía de la cámara magnética. La naturaleza de los productos emitidos, el orden de emisión de los mismos a lo largo del tiempo, permiten con un poco de experiencia en los mecanismos eruptivos, reconstruir la dinámica de la erupción y hacer un modelo del sistema hidrovulcánico. A continuación se presentan algunos ejemplos:

Consideremos una interacción agua-magma a un nivel superficial, como es el de una laguna cratérica. Cuando el magma asciende y llega a la laguna, se da inicio al fenómeno de interacción, con características explosivas, ya que el agua se vaporiza, se forman columnas eruptivas de gran volumen constituidas de vapor de agua, gases magnéticos, fragmentos de magma y evidentemente, fragmentos de las rocas que forman el lecho del lago. Con el desarrollo de la erupción, se forma una gran nube que produce y deposita en la cercanía del volcán, productos

muy característicos, siendo los lahares y los surges los más importantes.

Ahora se expondrá como se puede reconstruir en el campo este tipo de erupción, en base a una columna estratificada de los productos efusivos. En la Fig. No. 6, se aprecia en la base de la columna, el subsuelo de la región y luego sobreyaciendo a éste los productos relacionados con la erupción freatomagnética específica. Los primeros productos formados en este caso, son lahares, ya que gran cantidad de agua interacciona con el magma, el medio de transporte en este caso es lodo. Los lahares están constituidos de fragmentos de rocas superficiales preexistentes, fragmentos de magma juvenil y una matriz de lodo. Al progresar la erupción se pasa a fases en las cuales, el volumen del agua que interacciona con el magma es más reducido, en este caso, el medio de transporte es vapor húmedo y los depósitos consisten en surges húmedos y fríos. Después, debido a una continua disminución en el volumen del agua que interacciona, se pasa a surges secos, es decir el medio de transporte es vapor sobrecalentado. Las características de ambos depósitos son muy diferentes. Es evidente, que además de la secuencia de los mecanismos eruptivos que un vulcanólogo identifica perfectamente en el campo, es necesario además estudiar la naturaleza de los fragmentos de rocas preexistentes, para establecer de manera segura si la interacción a ocurrido a niveles superficiales. No existe probabilidad alguna que un mecanismo de este tipo, durante las explosiones superficiales, arranquen pedazos de rocas profundas.

Se considera ahora, el caso que nos interesa para la exploración geotérmica, como es la interacción de magma con acuíferos profundos. En la Fig. No. 7 se muestra un ejemplo de este caso. Partiendo de que el nivel de interrupción del magma sea superficial, esto implica naturalmente, que el magma en su ascenso atravesó el acuífero sin ningún problema particular, lo cual se debe a características particulares del mismo. Por las condiciones de viscosidad, contenido de gases y presión, la interrupción se realiza casi superficialmente y el nivel de la misma va descendiendo progresivamente a medida que la actividad a-

vanza hasta el momento en que este nivel llega a la zona donde existe el acuífero. Cuando el nivel de disrupción es superficial, los productos son únicamente magnéticos, es decir que los productos emitidos por el volcán serán sólo fragmentos de magma. Cuando el nivel de disrupción entra en contacto con el acuífero, se inician los fenómenos freatomagnéticos; es decir vaporización del agua contenida en el acuífero y el nivel de explosividad se localiza en este punto, lo cual ocasiona la fragmentación de las rocas de ese nivel, transportándose hacia la superficie una gran cantidad de fragmentos de rocas del acuífero. Entonces la secuencia estratigráfica que se observaría en el campo será: La erupción se inicia con productos magnéticos, por ejemplo, depósitos de caída (fall), después hay una transición normalmente por colapso de la columna eruptiva a flujos piroclásticos y después entra en acción la fase freatomagnética, cambiándose totalmente los caracteres de la erupción; se forman surges, los cuales se reconocen perfectamente. La vaporización instantánea del agua del acuífero provoca una gran explosión, dando como resultado una disminución inmediata del tamaño de las partículas y un notable incremento de la energía cinética de los mismos. Una secuencia de este tipo inmediatamente indica que en el subsuelo del volcán existe un acuífero. Desde el punto de vista geotérmico, interesa conocer si este acuífero es frío o caliente, lo cual puede averiguarse mediante los estudios petrográficos previamente realizados sobre los fragmentos de rocas muestreadas (xenolitos hidrotermalizados y sanos). Si las rocas han sido transformadas por circulación de fluidos calientes, deberán presentar minerales típicos, los cuales no tendrían razón de existir en el caso de que la roca haya estado en contacto con agua fría.

Se comenta que estos fenómenos son conocidos y su estudio es aplicado en muchos proyectos de exploración geotérmica. Definitivamente el freatomagnetismo tiene grandes posibilidades de aplicación, por ejemplo, se está investigando la posibilidad de estimar la cantidad de agua existente en el interior de un acuífero profundo en función de las características de los productos.

Se expone en mayor detalle la manera de estimar la temperatura. La estimación no es complicada y ella se basa en la experiencia obtenida en el estudio de la alteración hidrotermal, realizada a través del análisis de los materiales encontrados en los pozos geotérmicos en todas partes del mundo.

Si en un determinado volumen de roca, existe un sistema hidrotermal de temperatura progresivamente descendente, se establecerá desde la superficie hacia abajo, zonas de alteración hidrotermal que son caracterizadas por temperaturas menores que 150°C y minerales de tipo arcillas, principalmente montmorillonita, caolín y otros. El aumento de la temperatura con la profundidad, provoca el apareamiento de otros minerales como la clorita, moscovita, etc. en una zona que se llama filítica, en donde estos minerales son estables hasta los 250°C. A temperaturas mayores la paragenesis mineral cambia y aparece la epidota como mineral característico, asociada con feldespatos, ceolitas y una gran difusión de sílice, denominándose esta zona propilítica. Considerando la naturaleza de los minerales, se puede afirmar que las zonas argilítica y filítica son impermeabilizadas por self sealing y tienen la función de capa sello, mientras que la propilítica es una roca densa y muy frágil que puede adquirir permeabilidad por fracturación y normalmente es la que constituye los reservorios geotérmicos de alta entalpía.

La mineralogía hidrotermal es un sector especial de la investigación geotérmica durante la exploración. La identificación de estos minerales contribuye a determinar de manera aproximada la temperatura del acuífero y también ayuda a establecer la existencia de los otros elementos del campo geotérmico.

Vale comentar que muchas veces no son tomadas en cuenta variaciones de las propiedades físicas de las rocas debidas a los fenómenos de alteración causados por efectos hidrotermales. Por ejemplo, la densidad de la fase propilítica es muy alta comparada con las fases argilítica y filítica; también se puede afirmar que la alteración de los minerales magnéticos, ocasiona valores muy bajos en la susceptibilidad magnética.

sto se ha comprobado por ejemplo en Campi Flegrei en Italia y en el Imperial Valley de los Estados Unidos, en donde las anomalías geotérmicas están relacionadas, de manera muy evidente, con anomalías gravimétricas positivas y magnéticas negativas producidas por fenómenos de alteración hidrotermal. Estas anomalías fueron perforadas, por tal razón fue posible comprobar la relación existente entre estas y el efecto hidrotermal. En Campi Flegrei por ejemplo, la gravimetría ha sido utilizada para reconstruir de manera cuantitativa, la isotérmica del techo de la zona propilítica, la cual se estima en 250°C. Los resultados han sido buenos, ya que se pudo localizar los pozos de una manera muy satisfactoria.

Conclusiones y Recomendaciones

Finalmente se hacen dos sugerencias para la actualización de la Metodología OLADE: la primera se refiere a la necesidad de efectuar, desde la fase de reconocimiento, los estudios de los productos freatomagnéticos. Se opina que el problema real de la exploración geotérmica, no es tanto la identificación de zonas con una anomalía térmica, para lo cual ahora se dispone de muy buenos métodos, sino, la determinación de la permeabilidad en el subsuelo. Es en realidad este, uno de los tópicos más difíciles de resolver y el que ha incidido en gran parte en el fracaso de muchas perforaciones.

La segunda sugerencia se refiere, a que en la fase de prefactibilidad se realice una evaluación cuantitativa de la cámara magnética, lo cual contribuirá a la formulación del modelo térmico preliminar. Además aldría la pena revisar los estudios de reconocimiento hechos en años pasados, donde no se aplicaron estos nuevos métodos, con la finalidad de asegurar que las decisiones tomadas en esas épocas tengan consistencia con los adelantos indicados.

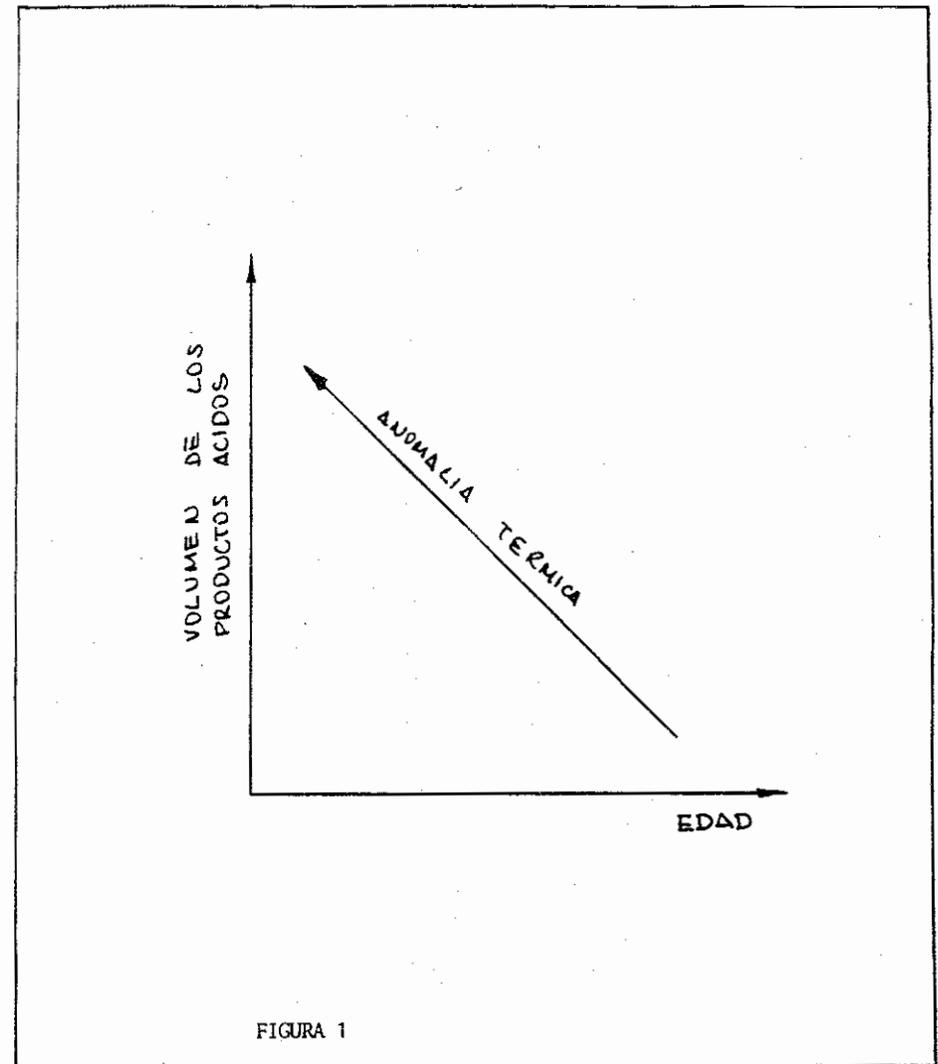
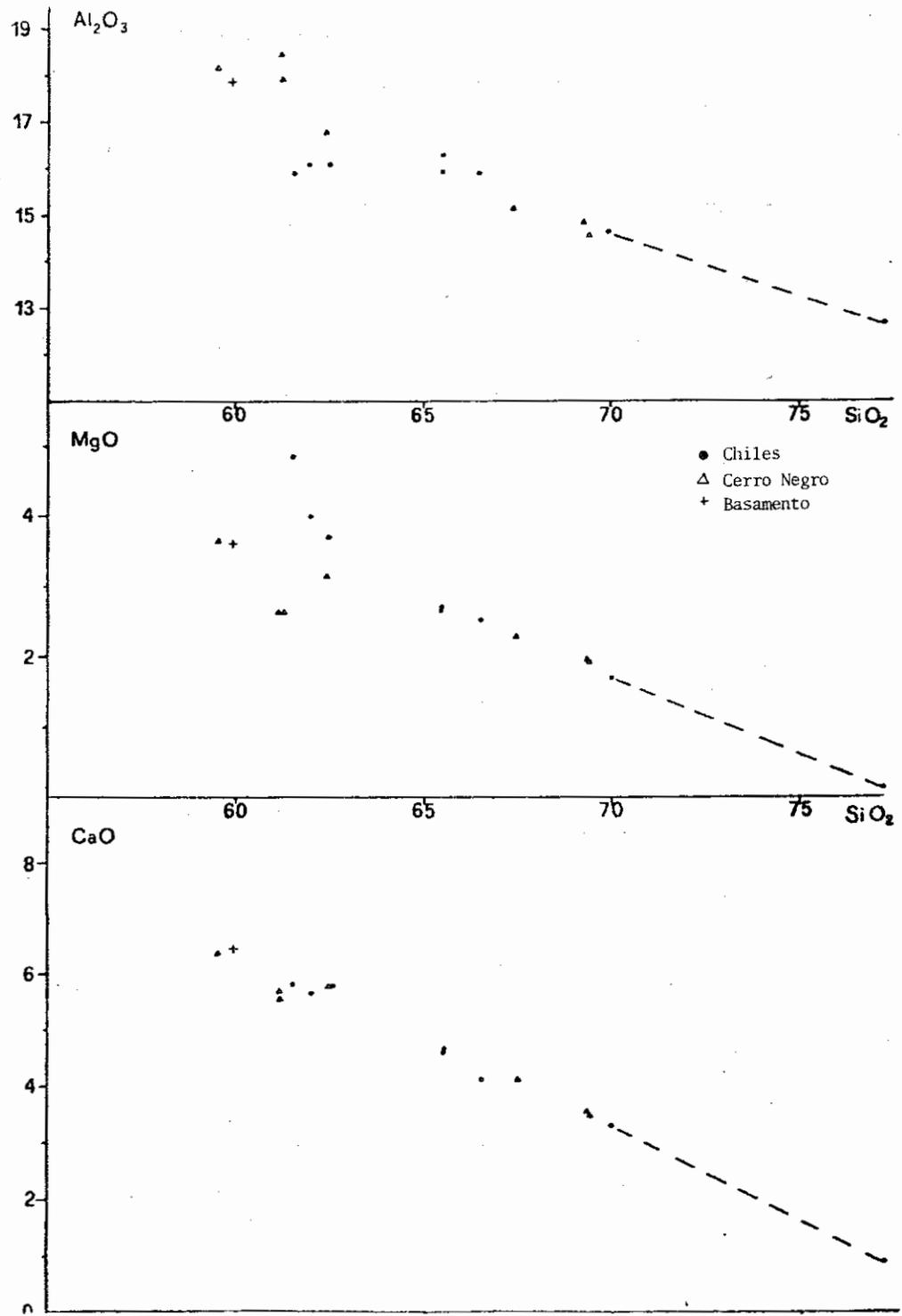


FIGURA 1



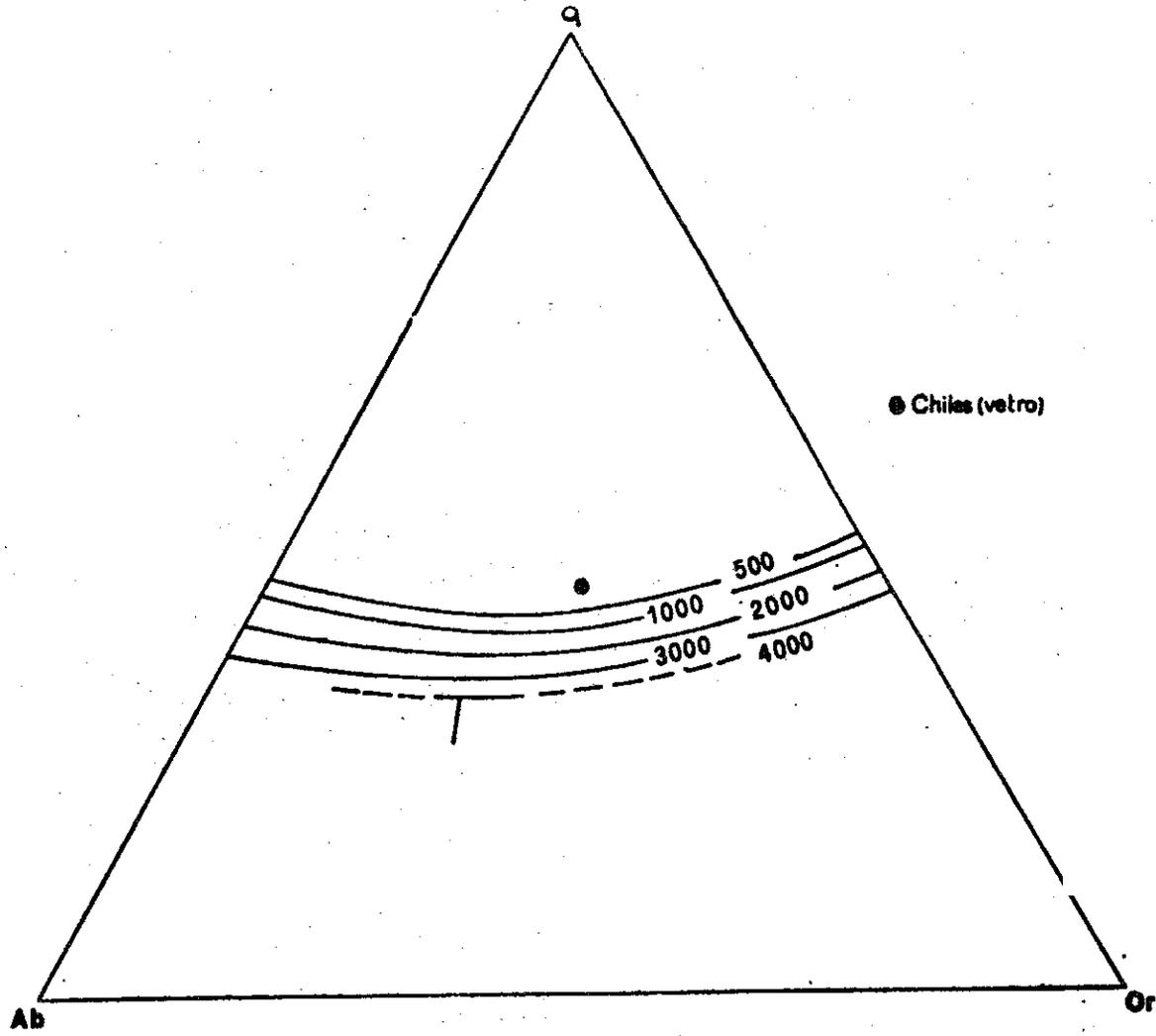
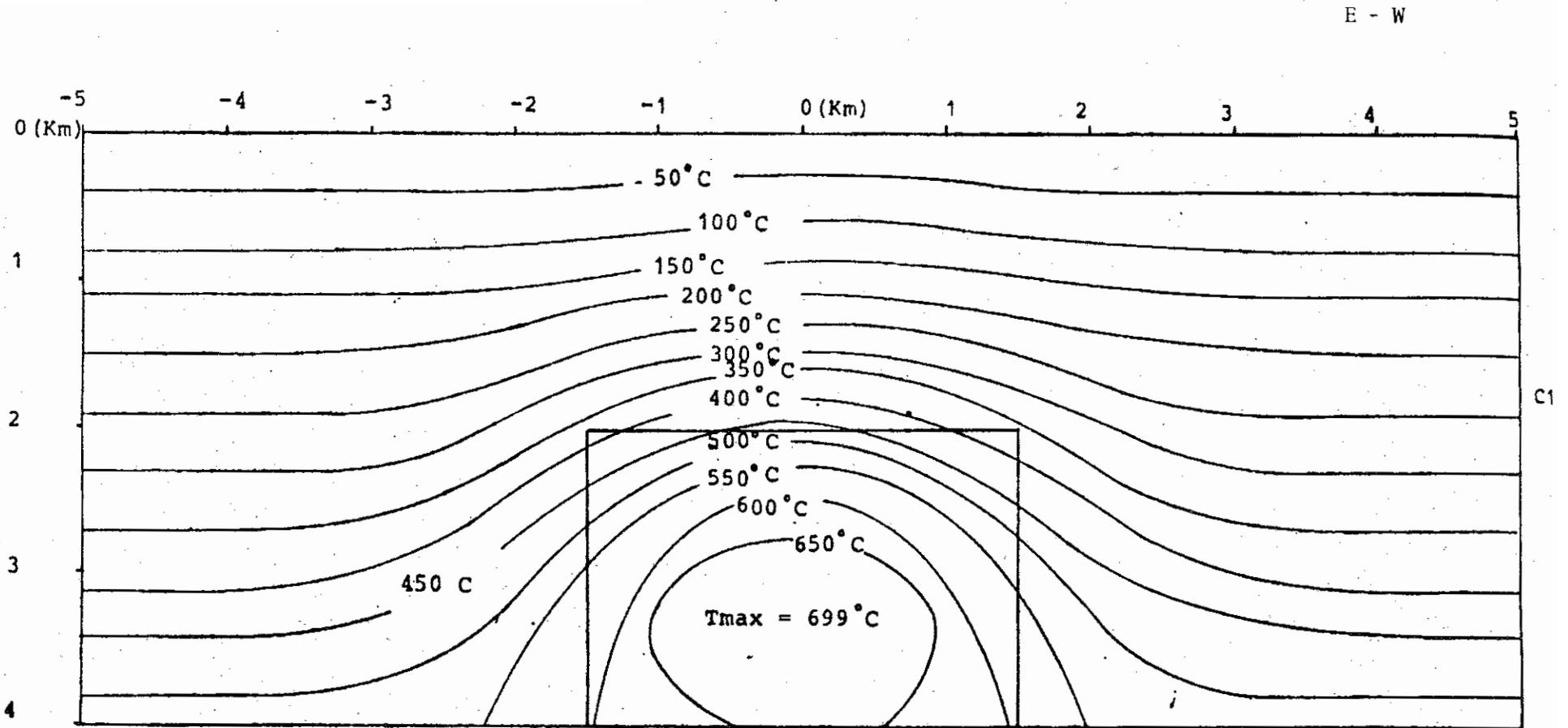
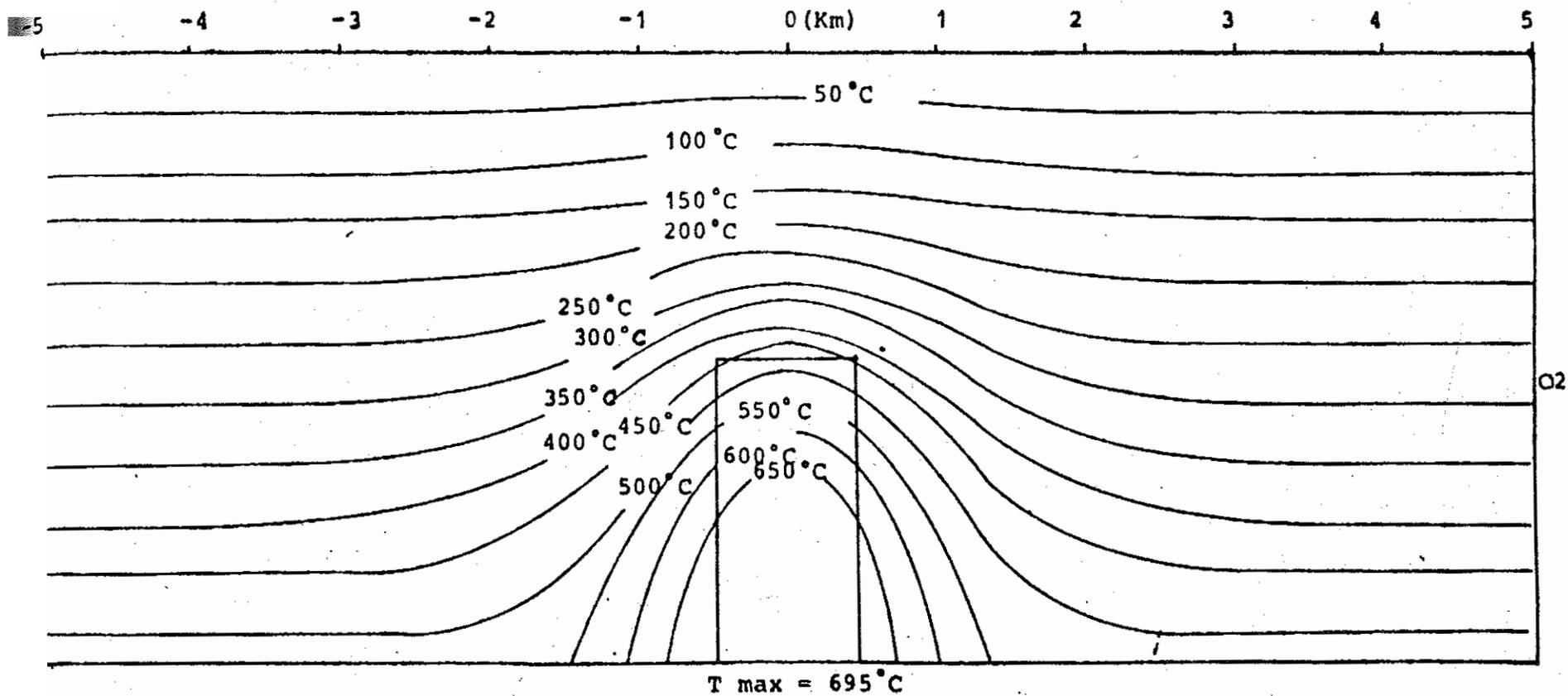


FIG. 3



MODELO CONDUCTIVO CHILES - CERRO NEGRO
Sección E - W

Figura 4



MODELO CONDUCTIVO CHILES - CERRO NEGRO
Sección N - S

Figura 5

SECUENCIA DEPOSICIONAL IDEALIZADA DE UNA ERUPCION HIDROMAGMATICA SUPERFICIAL

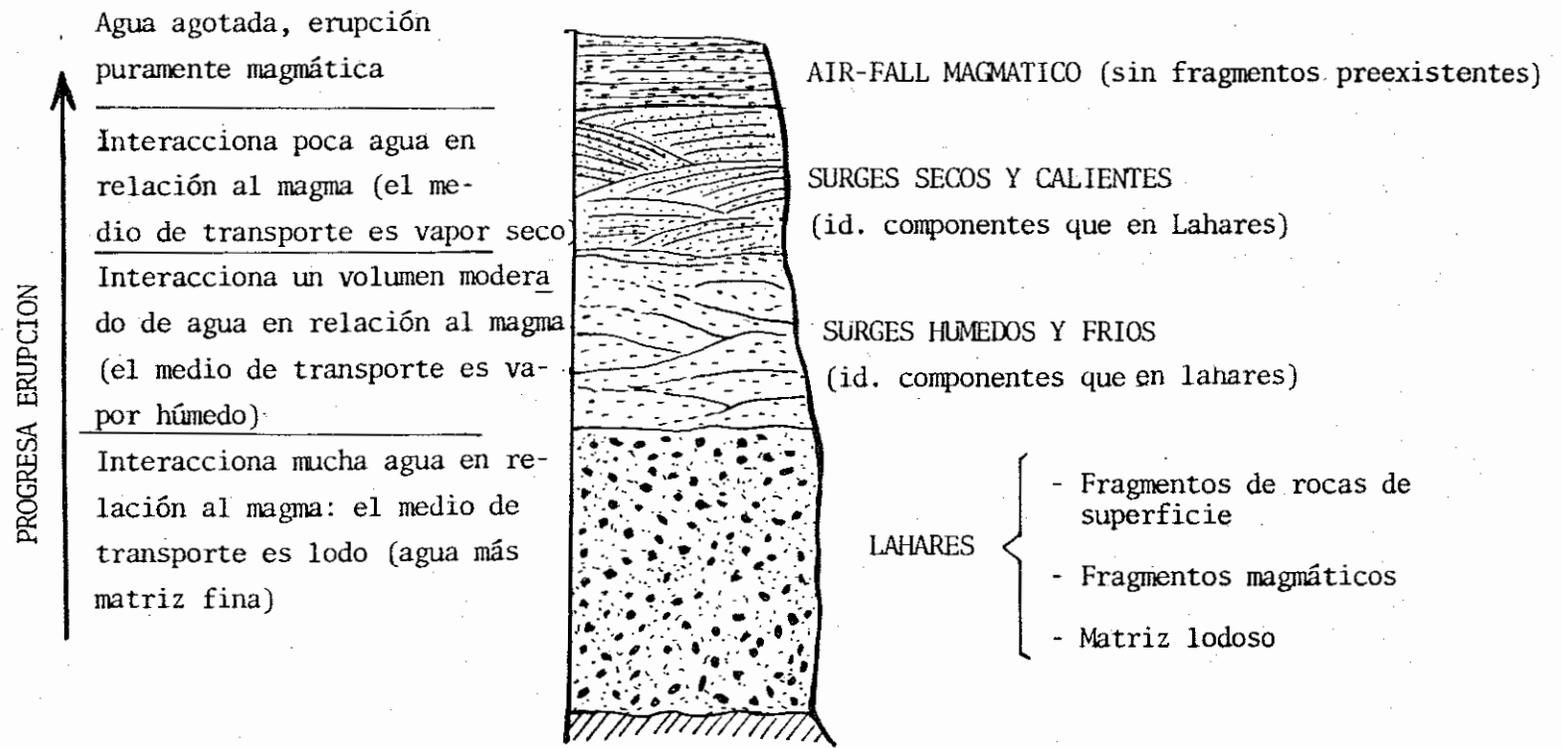


FIGURA 6

FORMAS DE INTERACCION PROFUNDA

(1. Acuífero o reservorio geotérmico)

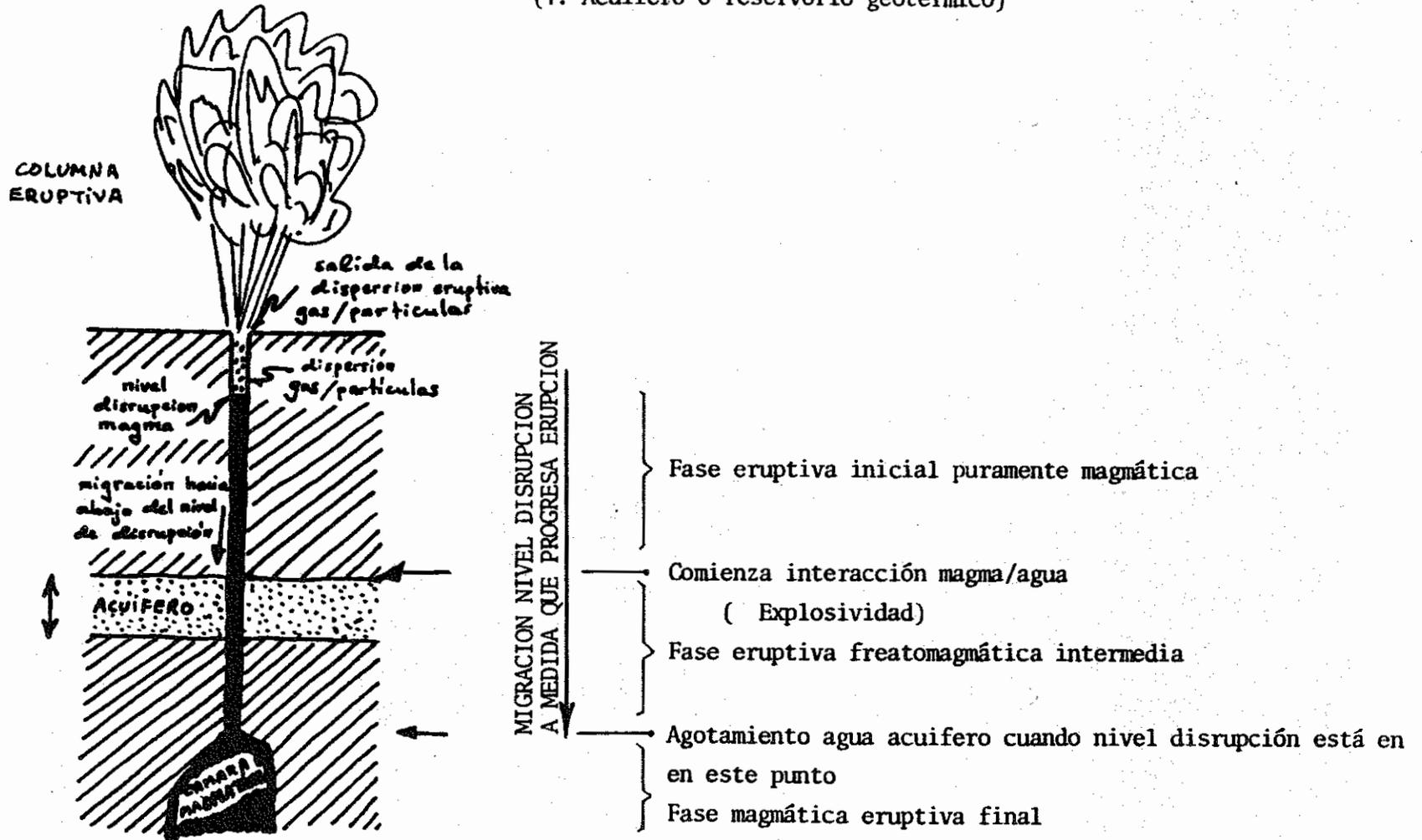
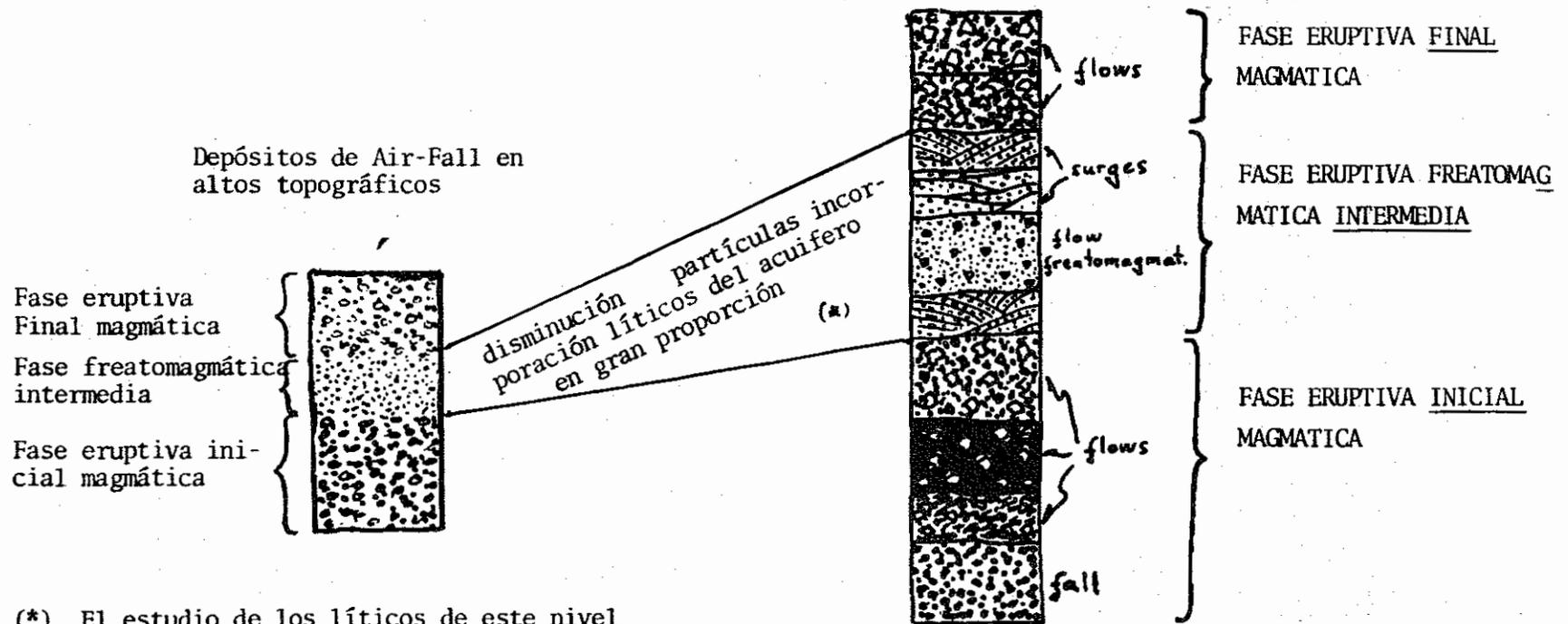


FIGURA 7

FORMAS DE INTERACCION PROFUNDA
(Secuencia deposicional idealizada)



(*) El estudio de los líticos de este nivel permite conocer en qué rocas se encuentra el acuífero y con frecuencia permite estimar la profundidad y la temperatura

FIGURA 7a

3.2.1. LA GEOQUIMICA EN LA EXPLORACION Y PRODUCCION GEOTERMICA

Robert O. Fournier
U.S. Geological Survey
(Servicio Geológico de los Estados Unidos)

RESUMEN

La geoquímica tiene muchos usos en un programa de desarrollo de recursos geotérmicos. Puede proporcionar información sobre las condiciones del reservorio antes y durante la producción, sobre la fuente de la recarga y sobre las direcciones del caudal. Tiene importantes aplicaciones relativas a los problemas de corrosión, incrustaciones y eliminación de residuos. Al utilizarse adecuadamente los geotermómetros químicos y los modelos de mezcla, aplicados a las aguas termales, pueden arrojar información precisa acerca de las temperaturas y salinidades del reservorio subsuperficial. Sin embargo, cuando se está interpretando los datos químicos, se debe prestar atención a la información geológica e hidrológica. Además, los modelos químicos tienen que ser consistentes con los datos isotópicos; la graficación de entalpía vs. cloruro, δD y ^{18}O son útiles en la determinación de dicha consistencia.

Las ecuaciones que expresan la solubilidad del cuarzo en el agua, a la presión del vapor de la solución y en función de: 1) la temperatura y 2) la entalpía, permiten calcular las temperaturas geotermométricas silíceas para las soluciones diluidas hasta los 330°C, con o sin la separación del vapor a cualquier temperatura. La solubilidad del cuarzo en las soluciones de NaCl (expresada en mg/kg), es parecida a la del agua pura a temperaturas menores a los 260°C. A temperaturas más

altas, la solubilidad del cuarzo en una solución salina aumenta mucho más en comparación al agua pura; esto es de gran importancia para determinar las condiciones en las que probablemente se producen incrustaciones de sílice.

INTRODUCCION

Las composiciones de los fluidos geotérmicos son controladas por una compleja interacción de procesos hidrológicos, químicos y físicos. Estos incluyen, la lixiviación de las rocas madres por los fluidos migratorios, la ebullición con la separación de los elementos volátiles entre las fases líquidas y de vapor, la mezcla de aguas con distintas salinidades y temperaturas, y reacciones gas-agua-roca en una amplia gama de temperaturas y presiones. La interpretación de las composiciones químicas e isotópicas de los líquidos, gases y sólidos que ocurren naturalmente, es de lo que trata la geoquímica.

Hasta cierto punto, la geoquímica hidrotermal está lanzándose en todas las direcciones, a la vez es una verídica "explosión" de información e ideas sobre el hidrotermalismo. Este estallido de actividad se ha producido por muchas razones: 1) avances tecnológicos en la instrumentación y las técnicas para obtener datos químicos e isotópicos; 2) exploración, perforación y producción de nuevos campos geotérmicos y publicación de la información obtenida de pozos realizados en diversos medios geológicos; 3) mayor utilización de computadoras y desarrollo de programas para modelar sistemas químicos e isotópicos y para almacenar, recuperar y manejar los datos; y, 4) necesidad de resolver varios problemas químicos, relacionados con la producción y evacuación de desperdicios.

Resumir aquí las numerosas ponencias, excelentes y diversas, sobre la geoquímica que han sido publicadas últimamente, sería imposible. Brevemente enfocaré algunas de las maneras, en que la geoquímica puede ser utilizada para coadyuvar a la exploración y producción de la energía geotérmica y revisaré unos asuntos geoquímicos que son de parti-

cular interés para mí actualmente. Sólo detallaré dos aspectos de la geoquímica, con los cuales he estado involucrado directamente: 1) el desarrollo de herramientas y técnicas geoquímicas para explorar y evaluar las perspectivas geoquímicas, y 2) la determinación de la solubilidad de cuarzo en soluciones hidrotermales y su aplicación práctica.

LOS MÚLTIPLES USOS DE LA GEOQUÍMICA

La geoquímica puede y debe ser utilizada en todas las fases de un programa de desarrollo de recursos geotérmicos, desde la exploración regional hasta la evaluación y producción de sitios específicos, inclusive. Cuando se utilizan adecuadamente los geotermómetros químicos e isotópicos (Ellis y Mahon, 1977; Fournier, 1977, 1981; Truesdell 1976a; Truesdell y Hulston, 1980; D'Amore y Panichi, 1980) y los modelos de mezcla (Fournier, 1977, 1979a; Truesdell y Fournier, 1977), pueden proporcionar excelente información sobre las temperaturas subsuperficiales. Los datos isotópicos pueden indicar la fuente, edad y volumen de agua que ha fluído por un reservorio geotérmico (Truesdell y Hulston, 1980; Ellis y Mahon, 1977). Las concentraciones de gas inerte pueden proporcionar información sobre la temperatura inicial del agua de recarga y si la ebullición subsuperficial ocurrió antes de la descarga en la superficie (Mazor, 1977). Las variaciones de composición en los gases del suelo pueden dar indicaciones de ebullición subsuperficial y de la presencia de fallas no evidenciadas, de otra manera, escondidas (Tonani, 1970; Kahler, 1981; Roberts, et. al., 1975; Koga y Tetsuro 1976). Los isótopos de helio en las fuentes termales, pueden ser utilizados para mostrar el transporte masivo desde las regiones subyacentes a la corteza continental (Craig, et. al., 1978).

La temprana caracterización química de los fluidos del reservorio es esencial, si se quiere anticipar y prevenir los problemas de incrustación, corrosión y ambientales. La variación espacial en la composición de los líquidos y gases, puede proporcionar información sobre el tamaño, configuración y temperatura de los reservorios y sobre las direcciones del fluidos. Los fluidos relativamente ricos en cloruros, tien-

den a encontrarse en las zonas de flujo ascendente de los sistemas hidrotermales predominantes en líquido y en las aguas relativamente ricas en bicarbonatos y sulfatos de las márgenes más frías y de las partes superiores de los sistemas líquido-dominante y vapor-dominante. Una excepción a esta generalización, ocurre en las rocas graníticas y metamórficas, donde aún las aguas ascendentes más calientes de los sistemas líquido-dominantes pueden contener poco cloruro.

Los fluidos producidos poco después de terminado el pozo, pueden proporcionar una primera (temprana) indicación de la temperatura del reservorio, mucho antes de que el pozo se recupere térmicamente de los efectos de enfriamiento del agua que circulaba durante la perforación (Fournier, et. al., 1980). Las cambiantes composiciones de los fluidos (líquidos y gases) producidas en los pozos, pueden ser utilizadas para vigilar los cambios en las temperaturas subsuperficiales, verificar la producción de los diferentes acuíferos y controlar tanto el agotamiento del reservorio como la entrada de aguas frías, mucho antes de que la entrada de agua sea detectada por reducciones en las temperaturas y entalpías del reservorio (Mahon- 1966; Ellis, 1977; Glover, 1970; Truesdell, 1976b; Truesdell, et. al., 1979; Grant, et. al., editándose).

Se han encontrado concentraciones relativamente altas de algunos elementos traza, tales como Zn, Pb y As, y la presencia de ciertos productos de alteración hidrotermal, tales como K-feldespatos, y que corresponden a zonas en donde flujos bastante grandes estaban presentes en el pasado (Browne, 1978; Christensen, et. al., 1980). Las zonas de permeabilidad relativamente alta, que persisten en la roca hasta el presente, probablemente estén localizadas dentro o cerca del lugar donde el líquido fluía con mayor facilidad en el pasado. Por lo tanto, un estudio de los elementos traza y de los productos de alteración hidrotermal en los cortes y núcleos, conforme vaya progresando la perforación, puede proporcionar información muy útil sobre como se termina un pozo.

Los estudios de los productos de alteración hidrotermal y las inclusio-

nes de fluido, pueden suministrar información sobre la historia térmica y química de un cuerpo determinado de roca y del agua que fluyó a través de él. En los estudios de depósitos minerales, las inclusiones de fluido primario son apreciadas por la información que arrojan sobre las condiciones de la época del crecimiento mineral, mientras las inclusiones de fluido secundario generalmente se consideran como una molestia (estorbo). En los estudios de los sistemas hidrotermales activos, sin embargo, sugiero que las inclusiones de fluido secundario, pueden proporcionar el tipo de información sobre las condiciones del reservorio que necesitamos, o sea, la gama de temperaturas y salinidades a las cuales ha estado sujeto un cuerpo determinado de roca. Esto quiere decir que el cuarzo, feldespatos y otros minerales que se formaron en la época de la cristalización de una roca ígnea, deben ser considerados en los estudios de las inclusiones del fluido secundario relacionadas con una actividad hidrotermal superpuesta.

INTERPRETACION DE LAS FUENTES TERMALES

Uno de los usos más generalizados de la geoquímica en los trabajos geotérmicos, es la estimación de temperaturas del reservorio en base a la composición de las aguas termales. Las ecuaciones para la geotermometría son relativamente sencillas, y parece que todos los que tienen acceso a los análisis calculan las temperaturas geotermométricas; lastimosamente, "los estudios geoquímicos" llegan solo hasta ahí. Esta podría ser una práctica aceptable, si sólo estuviera disponible una fuente para muestrear en una región dada, o si todas las aguas fueran idénticas. Sin embargo, éste no es el caso, por cuanto podemos y debemos hacer algo mejor que eso con nuestras interpretaciones.

La buena práctica interpretativa comienza con buenos procedimientos de muestreo. Esto incluye tanto la sabia selección de las aguas para análisis, como la correcta preservación de las muestras entre el momento de su recolección y su análisis (Ellis y Mahon, 1977; Shannon, et. al., 1978). Donde existen muchas fuentes disponibles para el muestreo, con

demasiada frecuencia han sido las aguas ebullientes o más calientes las recolectadas, mientras que no se presta atención a las de temperatura media y las frías. La recolección de sólo las aguas más calientes dificulta mucho la evaluación de los procesos conductivos y adiabáticos y la aplicación de modelos de mezcla, ya que todo eso requiere de un conocimiento de las composiciones de las aguas freáticas frías y no termales. La mejor estrategia de muestreo es la de recolectar de todas las aguas freáticas, tanto las calientes como las frías. Si, por algún motivo, existe una limitación sobre el número de muestras que se puedan tomar, se debe intentar conseguir un conjunto de muestras con una gran diversidad de temperaturas y composiciones. Un medidor de conductividad o papeles de prueba para el cloruro, se pueden utilizar para verificar las salinidades relativas de varias aguas, antes de tomar la decisión sobre cuales serán muestreadas.

En el momento del muestreo, se deben registrar las temperaturas y las tasas medidas o estimadas del flujo de masa, para cada pozo y fuente, hayan sido muestreados o no, así como también el flujo total de masa de la zona (estimado). En las zonas con temporadas lluviosas y secas, las fuentes deben ser muestreadas en épocas diferentes del año para determinar si existen cambios de temperatura, composición y tasas de flujo de masa, en función de los cambios de temporada. En las zonas con pocas fuentes, o ninguna, y donde no hay pozos de agua o de riego, se debe considerar la perforación de unos pocos pozos someros, específicamente para obtener muestras del agua freática para su análisis químico y para determinar los gradientes hidrológicos.

Cuando los datos analíticos están disponibles para varias muestras de agua, la interpretación debe comenzar con una evaluación general que indique como se relacionan las muestras entre sí. Las relaciones que involucran al ión cloro son particularmente importantes, porque es más probable que el cloro sea más conservado en un sistema hidrotermal, que la mayoría de los otros componentes disueltos, o sea, la concentración del cloruro en las aguas termales que ascienden de un reservorio, probablemente no va a cambiar de manera significativa por la interacción con la

roca madre, a menos que las aguas atraviesen evaporitas que contienen halita. Los cambios en las concentraciones de cloruro, probablemente sean el resultado de procesos de ebullición (evaporización) y mezcla, mientras las concentraciones de la gran parte de los demás componentes, también pueden cambiar como resultado de reacciones continuas entre las aguas y la roca. Para la interpretación de los datos analíticos se recomienda el siguiente procedimiento:

1. Buscar indicaciones de procesos de enfriamiento conductivo, de mezclas y de procesos adiabáticos, utilizando gráficos de Cl vs. $T^{\circ}\text{C}$ (temperatura medida en el punto de recolección), δD vs. ^{18}O , δD vs. Cl, y ^{18}O vs. Cl.
2. Buscar indicaciones de reacciones agua-roca a temperaturas intermedias, utilizando gráficos de Cl vs. SiO_2 , Cl vs. cationes (Na, K, Li, Ca y Mg) y Cl vs. HCO_3 (calculados a partir de los equivalentes totales de HCO_3 y CO_3).
3. Buscar grupos de aguas similares en composición, pero diferentes respecto de otras aguas. Las posibles maneras de subdividir en base a equivalentes de Na/K, K/Li, Cl/B, Cl/(HCO_3 y CO_3) y por los rangos de salinidad.
4. Dentro de los grupos de aguas similares, determinar las mejores muestras o los mejores datos químicos para su uso en el cálculo de las temperaturas geotermométricas.
5. Determinar si el modelo de mezcla de sílice es aplicable, utilizando los criterios tratados por Fournier y Truesdell (1974), Truesdell y Fournier (1977) y Fournier (1981).
6. Plotear las condiciones subsuperficiales interpretadas en un gráfico de entalpía vs. cloro.
7. Averiguar si los datos sobre el tritio y los isótopos estables son

consistentes con las relaciones mostradas en el gráfico de entalpía vs. cloro. Esto se puede realizar por medio de gráficos de entalpía vs. isótopos y de cloro vs. isótopos.

Quando el vapor se ha separado del agua antes de que ésta fuera colectada (una fuente en ebullición o agua de pozo flasheado), la composición isotópica de dicha agua tiene que ser corregida por la separación de los isótopos entre las fases del líquido y del gas. Truesdell, et. al., (1977) mostró que la composición isotópica final de una agua que flasheó de una temperatura y presión inicial determinada a una temperatura final, dependerá de si el vapor permaneció con el agua en ebullición hasta separarse de golpe a una presión dada (separación de vapor en una etapa), o si el vapor sufrió una eliminación continua o en múltiples etapas del líquido residual a una sucesión de presiones y temperaturas decrecientes específicas. Truesdell, et. al. (1977) da ecuaciones y gráficos para la determinación de las composiciones isotópicas de las aguas que resultan de la separación continua de vapor o la de una sola etapa. Encuentro útil construir diagramas de entalpía vs. δD y entalpía vs. ^{18}O , utilizando factores de fraccionamiento notado en dicho trabajo. Por ejemplo, en la Figura 1, el punto GF28 muestra los valores de entalpía y δD del agua de una fuente en ebullición (410 J/g), después de la separación en una cantidad desconocida de vapor. la concentración de sílice en dicha agua indica una temperatura inicial del reservorio de unos 260°C (1.134 J/g) si el agua se enfrió completamente a través de la conducción, o de 230°C (990 J/g) si se enfrió casi adiabáticamente. El punto A muestra la condición inicial del agua del reservorio si se enfrió por conducción, el punto B1 la condición inicial si se enfrió adiabáticamente con la separación de vapor en una sola etapa a presión atmosférica, y el punto B2 la condición inicial si se enfrió a través de la ebullición, debido a la decompresión por una separación continua del vapor. Como la fuente GF28 tenía solamente un caudal de 15 a 25 l/min en el momento de la recolección, y no estaba hirviendo vigorosamente, lo más probable es que el agua se enfrió, en parte por conducción y en parte por ebullición. La zona de la línea discontinua de la Figura 1, muestra la gama de condiciones iniciales para el reservorio y para todas

las combinaciones de enfriamiento conductivo y adiabático. El punto S1 da las composiciones isotópicas de todo el vapor que se separaría en un proceso de una sola etapa, y el punto S2, muestra la composición isotópica del primer vapor que se separa a los 230°C con una separación continua del vapor. La línea S2-S1 indica cómo la composición isotópica del vapor evolucionado, cambiaría conforme fuese disminuyendo la temperatura a lo largo de la curva B2-GF28. Un ploteo de entalpía vs. ^{18}O , para la muestra GF28, sería parecido al de la Figura 1.

Debería resultar un cuadro consistente, cuando las mismas aguas que han sido ploteadas en un diagrama de entalpía vs. cloruro, se plotean también en diagramas de entalpía vs. D y de entalpía vs. ^{18}O , si no existen deficiencias en el modelo o en los datos.

En algunas situaciones, los análisis de tritio pueden ser muy útiles en un programa de exploración geotérmica. Al aplicarse los geotermómetros geoquímicos, las aguas que han estado bajo tierra por mucho tiempo, lo cual se ven en los valores bajos en tritio, probablemente habrán alcanzado un equilibrio químico entre el agua y la roca más que aquellas que hayan estado bajo tierra por poco tiempo (altas en tritio). Cuando se está evaluando el significado hidrológico de la mezcla de aguas de temperaturas bajas con otras de temperaturas altas, es conveniente saber si el componente de baja temperatura proviene de un fuente local a poca profundidad o de un acuífero frío más profundo. Donde las fuentes termales o agua de pozo contienen diversas cantidades de cloruro y tritio, como consecuencia de los diversos grados de mezcla entre las aguas caliente y las frías, la extrapolación a cero de tritio, arroja el máximo de cloruro del componente profundo. La repetición de análisis de tritio y cloruro, durante un lapso prolongado, se puede utilizar para confirmar que el componente profundo tiene cero en tritio. La información sobre la concentración de cloruro en el componente profundo de temperatura alta, a su vez, puede ser utilizada en un modelo de mezcla entalpía-cloruro, para estimar la temperatura del agua caliente en base de aquel componente.

Al interpretar los geotermómetros químicos, hay que tener en cuenta los efectos que las diferentes condiciones hidrológicas pueden tener sobre las composiciones de las aguas termales. La confiabilidad o confianza que se pone en los resultados geotermométricos particulares, deberían depender del número de las aguas termales que fueron analizadas y las tasas de flujo de masa y las temperaturas medidas en dichas aguas.

Si los geotermómetros de sílice, Na-K-Ca y Na/K, nos dan temperaturas que exceden a los 150°C y las concentraciones de Mg^{+2} son relativamente bajas, existen buenas posibilidades de que la temperatura sea tan alta o mayor que la indicada por los geotermómetros. Si la temperatura sílica es mucho menor (< 25°C) a las temperaturas de Na-K-Ca, Na-K-Ca-Mg y Na/K, entonces la sílice puede haberse precipitado en la solución después de haber salido del reservorio, o el agua es una agua mezclada que no llegó a re-equilibrarse después de su mezcla. Si los geotermómetros de la sílice (calcedonia) y de Na-K-Ca, arrojan temperaturas menores a 100°C y Na/K por encima de los 100°C, esta última probablemente es la errónea. Si una agua contiene poco Mg y la temperatura de Na-K-Ca es varios grados mayor a la de Na/K, la primera puede ser demasiado alta porque, el $CaCO_2$ precipitó en la solución antes de que el agua fuera colectada (o después de colectada si la muestra no fue acidificada). La precipitación de $CaCO_3$ probablemente haya influido en la temperatura calculada con Na-K-Ca si la solución estaba saturada en relación a la calcita, en el momento del muestreo. Sin embargo, aun que la solución puede no estar saturada con respecto a la calcita en el momento de la recolección, el $CaCO_3$ puede haberse precipitado de una solución hirviendo subsuperficial, por la subsecuente saturación del $CaCO_3$ en la solución al enfriarse.

La aplicación de una corrección de Mg^{+2} para el geotermómetro Na-K-Ca puede ser esencial, si el agua realmente proviene de un medio subsuperficial de baja temperatura (< 100°C). Sin embargo, si el agua proviene de un ambiente de alta temperatura y recoge Mg^{+2} en el camino a la superficie, la corrección de Mg^{+2} llevará hacia una temperatura estimada demasiado baja. En la actualidad, no existe una manera fácil de

determinar cuando se debe aplicar la corrección de Mg^{+2} , o cuando se debe pasarla por alto.

La coincidencia entre el geotermómetro isotópico $^{18}_\Delta O$ ($H_2O-HSO_4^-$) y otros, sugiere que el agua había tenido un tiempo de residencia relativamente largo en un reservorio subsuperficial y a una temperatura aproximada a la indicada.

En algunos lugares, tales como el Parque Nacional de Yellowstone, Wyoming (McKenzie y Truesdell, 1977) y Long Valley, California (Fournier et al., 1976), el geotermómetro $^{18}_\Delta O$ ($H_2O-HSO_4^-$), da temperaturas mucho más altas que las indicadas por los métodos de sílice y cationes, pero están de acuerdo con las temperaturas de los modelos de mezcla. Cuando la temperatura de $^{18}_\Delta O$ ($H_2 - HSO_4^-$), es mayor a las otras temperaturas geotermométricas, sugiere que están presentes reservorios con temperaturas intermedias y que el agua fluye a través de ellos con un tiempo de residencia de pocas semanas hasta pocos meses.

ACTUALIZACION SOBRE LA SOLUBILIDAD DE CUARZO Y SUS APLICACIONES PRACTICAS

En el transcurso de los últimos años, se ha producido una acumulación de resultados experimentales debido a varios trabajos sobre la solubilidad del cuarzo en el agua en o cerca de la presión del vapor de la solución (Fournier y Potter, 1982). Los datos sugieren que la solubilidad del cuarzo a los 250°C, es ligeramente menor a la dada por Fournier y Rowe (1966).

Una ecuación modificada de la solubilidad del cuarzo en el agua, a lo largo de la curva de la presión-vapor para la gama de temperaturas entre 25 y 330°C, puede ser apreciada en Fournier y Potter (editándose), como:

$$t = C_1 + C_2S + C_3S^2 + C_4S^3 + C_5 \log S \quad (1)$$

donde t es la temperatura en grados Celsius, S es la concentración de sílice en mg/kg y $C_1 - C_5$, son las constantes presentadas en la Tabla 1.

Otras curvas de la solubilidad de cuarzo en función de la presión del vapor han sido sugeridas (Walther y Helgeson, 1977; Fleming y Crerar, 1982), y están considerablemente por debajo de la curva de Fournier y Potter. Creo que los valores calculados de Walther y Helgeson (1977) son bajos, porque suponen que las solubilidades del cuarzo a 1013 bares, reportados por Morey, et. al. (1962) fueron correctos. Ahora parece que a 1013 bares y a temperaturas menores a 200°C, Morey, et. al. midieron la solubilidad de la calcedonia en lugar del cuarzo. La posición de la curva de Fleming y Crerar (1982), está fuertemente influenciada por los resultados de experimentos realizados por Crerar y Anderson (1971). Fournier (1979b) y Fournier y Potter (1982), llegaron a la conclusión de que la técnica experimental empleada por Crerar y Anderson (1971), probablemente produjo valores para la solubilidad de cuarzo demasiado bajos. Si la curva de solubilidad de cuarzo de Fournier y Potter (editándose) es correcta, entonces la excelente discusión de Fleming y Crerar sobre los efectos de pH sobre la solubilidad del cuarzo y sus aplicaciones en el procesamiento del fluido geotérmico deben ser modificada, utilizando:

$$\log K_c = D_1 + D_2T^{-1} + D_4T^{-2} + D_5T^{-3} \quad (2)$$

donde K_c es la solubilidad molal del cuarzo da un pH neutro, T es la temperatura absoluta y $D_1 - D_5$ son las constantes que aparecen en la Tabla 1.

En la descripción del geotermómetro de sílice proporcionada por Fournier y Rowe (1966), se trazaron dos curvas de referencia; la una mostró la sílice disuelta con enfriamiento conductivo y la otra, la sílice disuelta después de enfriamiento adiabático hasta 100°C, a una entalpía constante. Sin embargo, donde existan fuentes hirvientes a elevaciones altas, el enfriamiento adiabático continua hasta temperaturas significati

vamente menores a los 100°C. Fournier y Potter (editándose), utilizan un gráfico de sílice disuelta vs. entalpías (Fig. 2), como un método sencillo de corregir la separación del vapor a cualquier temperatura. La entalpía del agua líquida a la temperatura de recolección (o presión de recolección), se puede determinar en base a tablas de vapor (Keenan, et. al., 1969). Los puntos C y E de la Figura 2, representan dos muestras tomadas después de una pérdida de vapor a diferentes temperaturas, y la línea AB muestra la solubilidad del cuarzo a la presión del vapor de la solución en función de la entalpía. Los puntos G_C y G_E , muestran la entalpía del vapor en equilibrio con los puntos C y E respectivamente. Las intersecciones de las líneas trazadas del G_C a C y del G_E a E con la curva AB (los puntos F y D, respectivamente), dan las entalpías iniciales de los fluidos del reservorio antes del enfriamiento adiabático. Fournier y Potter (editándose) da la ecuación de la línea AB como:

$$S = E_1 + E_2H + E_3H^2 = E_4H^3 + E_5H^4 \quad (3)$$

donde S es la concentración de la sílice en mg/kg, H es la entalpía del agua líquida en J/g y $E_1 - E_6$ son las constantes presentadas en la Tabla 1. También dan un programa de computadora en BASIC, para calcular las temperaturas geotermométricas silícicas (cuarzo) con enfriamiento adiabático a cualquier temperatura, con temperaturas iniciales del reservorio hasta 300°C y un programa de computadora para calcular las temperaturas de los modelos de mezcla con o sin una pérdida de vapor antes de la mezcla.

Fournier y Potter (1982), encontraron que en los gráficos logarítmicos de la sílice disuelta vs. el volumen específico del agua, los datos experimentales caen a lo largo de curvas isotérmicas suaves y casi paralelas, y diseñaron una expresión que ajusta muy bien muchos de los datos. La ecuación de Fournier y Potter (1982), permite la corrección del geotermómetro de sílice (ya derivado para condiciones de presión) en función de los efectos de presión en los reservorios profundos.

Hasta este punto, la geotermometría de sílice ha sido discutida para las soluciones diluidas, pero ¿cuál es el efecto de la sal disuelta? Esto es de gran interés desde el punto de vista de las incrustaciones. En base a la pequeña cantidad de datos, Fournier y Rowe (1966), llegaron a la conclusión de que la adición de 2 m NaCl, generalmente no influye de manera significativa en la solubilidad del cuarzo. Esta conclusión ahora parece válida para la presión de vapor de la solución, sólo a temperaturas por debajo de unos 260°C, y a presiones altas (> 1.000 bares) por debajo de 400°C, cuando las solubilidades están expresadas en unidades de mg/kg. La Figura 3 muestra la solubilidad del cuarzo en agua pura y con 4 m NaCl a 350°C en función de la presión. En la Figura 3 cabe notar la diferente posición entre las líneas del agua pura con la de 4 m NaCl, cuando las solubilidades están expresadas en mg/kg y en unidades de molaridad.

Fournier (editándose), ha desarrollado un método para calcular las solubilidades del cuarzo en soluciones de NaCl a cualquier temperatura y presión, para lo cual dispone de datos sobre la densidad de la solución; Fournier y Marshall (editándose), han extendido este método a la sílice amorfa en una gran variedad de soluciones salinas. En la Figura 4 se pueden apreciar, las solubilidades calculadas para el cuarzo en soluciones de NaCl y agua pura, de diferentes molaridades y a la presión de vapor de la solución. En base a la información presentada en la Figura 4, opino que conforme vayamos perforando reservorios profundos, con temperaturas y salinidades más altas, podremos encontrar salmueras con un potencial tremendo de incrustación de sílice muy por encima de los potenciales esperados de los datos para agua pura.

Finalmente quisiera especular brevemente, sobre las limitaciones que el comportamiento geoquímico de la sílice puede imponer a los modelos hidrológicos del agua que circula cerca de roca o magma muy caliente. En vista de los máximos de solubilidad indicados (en la Figura 4), el agua diluida que se calienta a temperaturas por encima de los 350-400°C, precipitarán cuarzo como resultado de dicho calentamiento. El cuarzo precipitado puede tapar los canales del flujo a tal grado, que se

formaría una barrera impermeable separando un sistema diluido de baja temperatura (350°C), de una salmuera o gas de alta temperatura. Si una salmuera llena el espacio abierto en el lado de la barrera (que tiene una temperatura alta), el gradiente térmico de dicha barrera puede ser muy grande y la presión del fluido en los espacios porosos, en el lado de la temperatura alta, puede ser igual a la presión litostática. Los que perforan hacia objetivos de una temperatura muy alta, deben tener en cuenta que tanto las temperaturas como las presiones de los fluidos, pueden aumentar repentinamente y mucho más rápidamente de lo anticipado.

FIG. 1. Gráfico de la entalpía-versus δD , mostrando la gama posible de condiciones iniciales de reservorio y vapor separado, para distintos mecanismos de enfriamiento que produce el agua caliente de residual, representada por el punto GF28. Véase el texto para los comentarios al respecto.

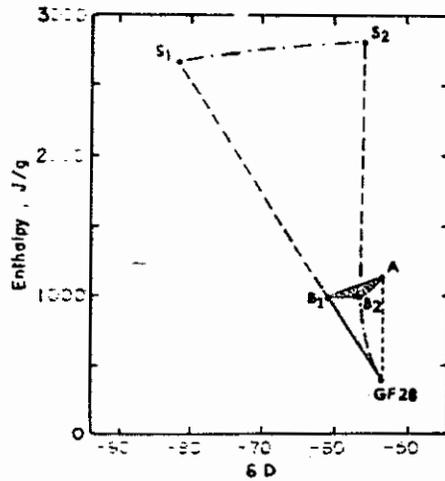


FIG. 2. Sílice disuelta versus entalpía para cuarzo disuelto en agua pura a la presión de vapor de las soluciones. Véase el texto para las explicaciones correspondientes.

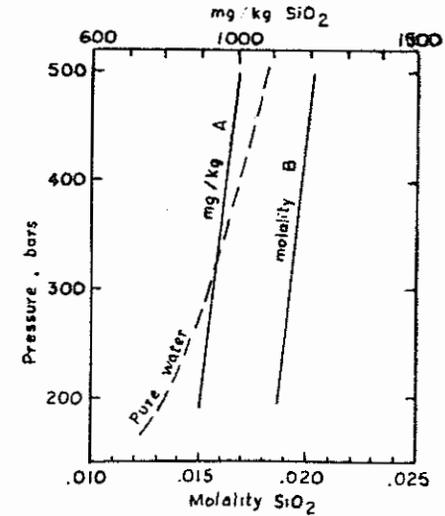
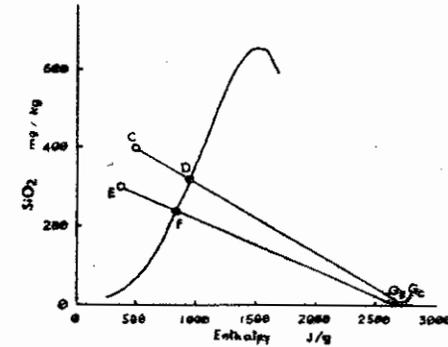
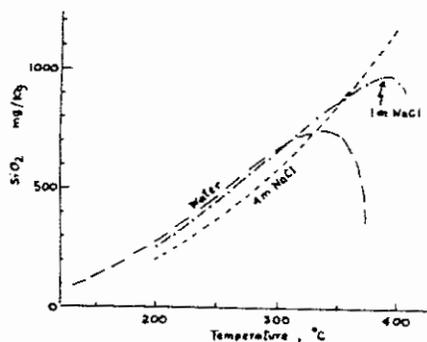


FIG. 4. Cuarzo disuelto en soluciones de agua y NaCl a las presiones de vapor de las soluciones.



Fournier, R.O. and Potter, R.W., II 1982, An equation correlating the solubility of quartz in water from 25°C to 900°C at pressures up to 10000 bars: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 46.

Glover, R.B., 1970, Interpretation of gas compositions from the Wairakei field over 10 years: *Geothermics*, v. 2, p. 1355-1366.

Mazor, E., 1977, Geothermal tracing with atmospheric and radiogenic noble gases: *Geothermics*, v. 5, p. 21-36.

Shannon, D.W., Woodruff, E.M., Watson, J.C. Douglas, J.G., Thompon, S.J., and Serne, R.J., 1978, Sampling and analysis methods for geothermal fluids and gases-preliminary edition: Batelle-Northwest, PNL-2570, Richland, WA.

Truesdell, A.H., and Fournier, R.O. 1977, Procedure for estimating the temperature of a hot water component in a mixed water using a plot of dissolved silica vs. enthalpy: *U.S. Geological Survey Journal of Research*. v.5, N° 1, p. 49-52.

Truesdell, A.H., Nathenson, M., and Tye, R.O., 1977, The effects of sub-surface boiling and dilution on the isotopic compositions of Yellowstone thermal waters: *Journal of Geophysical Research*, v. 82, p. 3694-3703.

Walther, J.V., and Helgeson, H.C., 1977, Calculation of the Thermodynamic properties of aqueous silica and the solubility of quartz and its polymorphs at high pressures and temperatures: *American Journal of Science*, v. 277, p. 1315-1351.

TABLE 1 - CONSTANS FOR EQUATIONS 1, 2, and 3.

EQUATION 1

$$\begin{aligned}C1 &= -4.2198 \times 10^1 \\C2 &= 2.8831 \times 10^{-1} \\C3 &= -3.6686 \times 10^{-4} \\C4 &= 3.1665 \times 10^{-7} \\C5 &= 7.7034 \times 10^1\end{aligned}$$

EQUATION 2

$$\begin{aligned}D1 &= 1.3290 \times 10^1 \\D2 &= -9.4573 \times 10^{-3} \\D3 &= -7.5578 \times 10^3 \\D4 &= 1.2488 \times 10^6 \\D5 &= -8.2181 \times 10^7\end{aligned}$$

EQUATION 3

$$\begin{aligned}E1 &= -3.5532 \times 10^0 \\E2 &= 1.4600 \times 10^{-1} \\E3 &= -4.9270 \times 10^4 \\E4 &= 1.2305 \times 10^{-6} \\E5 &= -4.9421 \times 10^{-10}\end{aligned}$$

5.1. METODOS HIDROGEOLOGICOS APLICADOS A LA EXPLORACION GEOTERMICA

Paul Witherspoon

Profesor de la Universidad de California
Berkeley - U.S.A.

Los métodos hidrogeológicos aplicados a la exploración geotérmica tienen dos objetivos: primero definir la circulación de fluidos en el sistema geotérmico, y el segundo, definir el modo de circulación de aguas subterráneas en los sistemas que se encuentran sobre el reservorio geotérmico y, la interacción que puede existir entre ambos.

Para conocer los acuíferos superficiales, es necesario emplear los métodos hidrogeológicos clásicos. Es decir, medición de niveles en pozos, medición de flujos en pequeños ríos y, especialmente medición del caudal de las manifestaciones. En este último caso, es muy importante determinar la magnitud del flujo de masa y energía. Otra medida muy importante es la precipitación y, si es posible, determinar el porcentaje que de esta se infiltra como recarga de los sistemas superficiales y geotérmicos. Sin embargo, en áreas geotérmicas generalmente es difícil aplicar los métodos hidrogeológicos clásicos. Por ejemplo, en muchas zonas de la Cordillera de los Andes la posibilidad de realizar mediciones son muy escasas.

Desde el punto de vista del desarrollo de un sistema geotérmico, el problema de conocer la circulación de fluidos es importante. Además es necesario definir las condiciones y fronteras del reservorio, para establecer la localización de pozos profundos de exploración y explotación. Estas condiciones consisten en la fuente de calor bajo del reservorio, las condiciones de flujo de masa y energía a los lados del reservorio y también las pérdidas de masa y energía a través de la capa sello. Si

es posible construir un modelo del sistema natural, que incluya todas estas condiciones, se tendrá una herramienta ideal para entender el comportamiento del sistema total.

Parece que con los nuevos métodos desarrollados por los geólogos y vulcanólogos, existe la posibilidad de obtener nuevas informaciones sobre la existencia de un reservorio geotérmico. Ellos sostienen que con los métodos nuevos, es posible ahora determinar la existencia de una cámara magnética en un área de interés geotérmico. También ellos sostienen que es posible determinar el volumen de esta cámara, su temperatura, edad y profundidad. Con estos datos es factible construir un modelo preliminar del sistema geotermal en su estado natural. Se indica también que es posible establecer la distribución de temperaturas en el subsuelo, si el flujo de calor es por conducción.

Con el fin de obtener mejores estimaciones sobre las temperaturas en el subsuelo, será necesario también calcular la convección de calor, por lo que se deberá determinar la permeabilidad de las rocas del reservorio. Está claro que para esto, necesitamos perforar pozos profundos. Sin embargo, en la etapa de prefactibilidad, un modelo del sistema natural que incluya la conducción y convección de calor, y que utilice estimaciones de la permeabilidad del reservorio, será muy útil para entender la dinámica del sistema geotérmico. Luego en la etapa de factibilidad este modelo será mejorado y ampliado, cuando hayan más datos sobre el reservorio geotérmico.

Otro aspecto muy importante es que el modelo preliminar del sistema geotérmico, puede incorporar todos los datos y conceptos desarrollados por todos los geocientíficos que participan en el proyecto. Este modelo puede servir como una forma de integración de todas estas informaciones, es decir, permitirá establecer las mejores zonas donde localizar pozos de producción e inyección y los gastos de producción de los pozos, lo que permitirá optimizar la extracción del calor geotérmico almacenado en el subsuelo.

3.4.1 LA GEOFISICA EN LA EXPLORACION GEOTERMICA

A. Duprat

La geotermia forma parte de las nuevas fuentes de energía, cuyo interés ha aumentado después de la primera alza de precio del petróleo en 1973. Es una fuente de energía que presenta características interesantes, pues es renovable y no contaminante. De 1975 a 1981, la potencia instalada alimentada por la energía geotérmica pasó de 1280MW a 2514MW, y debería alcanzar 5350MW en 1985, lo cual representaría un cuadruplicamiento en 10 años. Según informaciones publicadas por "Oil and Gas Journal" en el ejemplar del mes de Mayo de 1982, la repartición y las previsiones por país serían las siguientes:

	1981 (en MW)	1985 (en MW)
E.E.U.U.	932.2	1,887
Filipinas	446	885
Italia	439.6	550
Nueva Zelandia	202.6	353
México	180	645
Japón	168	650
El Salvador	95	150
Islandia	32	60
Otros	18.6	170

Las primeras búsquedas en el dominio de la Geotermia, se efectuaron en las proximidades inmediatas de los indicios superficiales, dejando pre

sagiar la presencia de un campo geotérmico. Cerca de las fumarolas o de fuentes muy calientes, se efectuaban pequeñas perforaciones y se utilizaba el fluido obtenido, por su riqueza en sales minerales (Lardarello en Italia a principios del siglo XX).

Quando alguien consideró la idea de utilizar el vapor natural como fuente de energía, hubo que encontrar los medios para investigar bajo la superficie, a profundidades considerables, con el objeto de descubrir un fluido cuyas características encuan to a temperatura y presión se refieren, fueran favorables a su utilización industrial. Los métodos geofísicos constituyen uno de estos medios para tal propósito.

Estos métodos forman parte de un conjunto de técnicas que intervienen en la búsqueda de vapor natural, a saber:

- la geología que permite obtener un análisis detallado de la estratigrafía y de la litología de las diferentes formaciones aflorantes, y contribuye al conocimiento de la tectónica, por levantamientos de superficie y el estudio de fotos aéreas;
- la vulcanología que estudia los fenómenos volcánicos generalmente relacionados a los campos geotérmicos.
- la hidrología que tiene por misión establecer la cantidad de agua que puede penetrar en el o los acuíferos profundos;
- la geoquímica que provee informaciones acerca de la composición y del origen de las aguas y gases que llegan a la superficie, lo cual constituye el primer paso para el estudio de los fenómenos termodinámicos
- la geofísica, cuyo papel esencial es el de contribuir al conocimiento de la tectónica, al estudio de la naturaleza litológica y del espesor de la capa impermeable que cubre el acuífero. En ciertas condiciones geológicas particulares, la geofísica puede también contribuir a la localización de fuentes de calor profundas. También es necesario in-

cluir en esta técnica las diagraffas en las perforaciones, como también las medidas de temperatura efectuadas en pequeñas perforaciones destinadas a conocer el gradiente térmico;

- la perforación que representa la fase concluyente y decisiva de la búsqueda.

Las condiciones geológicas en las cuales se encuentran los campos geotérmicos en exploración, o actualmente estudiados, permiten clasificarlos a groso modo en dos grupos:

- a) El primero en clasificarse es el de tipo sedimentario, el cual, contiene por lo menos un acuífero permeable, generalmente cubierto con una capa de arcilla considerada como poco permeable o sencillamente impermeable. Este es el caso de los campos tales como Lardarello y Monte Amiata (Toscana - Italia), de Kizildere (Turquía), Cerro Prieto (México) y el Imperial Valley (América del Norte). En los de Toscana por ejemplo, el depósito está representado por calizas cavernosas del Rético o esquistos y cuarcitas del Pérmico, recubiertos por una capa de flysch esencialmente arcillosa que asegura su protección.
- b) El segundo incluye los campos volcánicos, los cuales están normalmente localizados en zonas de alteración hidrotermal. Este es el caso de Nueva Zelandia y El Salvador.

La elección de los métodos geofísicos que serán utilizados, dependerá esencialmente de las condiciones geológicas de las zonas que van a ser estudiadas y, naturalmente, algunos de los métodos a aplicarse serán más apropiados a uno u otro de los tipos de yacimientos descritos anteriormente. En el primer caso (sedimentario), el estudio de la tectónica, de la profundidad del depósito y su geometría, como también la magnitud del gradiente geotérmico, constituirán en general los problemas que deberá resolver la geofísica. En el segundo caso se delimitarán esencialmente las zonas de alteración hidrotermal y las zonas calientes.

Tanto los campos sedimentarios como los volcánicos pueden encontrarse en un mismo sector. Esquemáticamente pueden presentarse en las condiciones geológicas siguientes:

- ya sean formaciones volcánicas, acumuladas sobre depósitos sedimentarios arcillosos o margosos, bajo los cuales se encuentra el yacimiento (el caso de Viterbo-Italia, por ejemplo);
- ya sea un recubrimiento sedimentario, encima de un depósito de naturaleza volcánica (Taiwan - México por ejemplo).

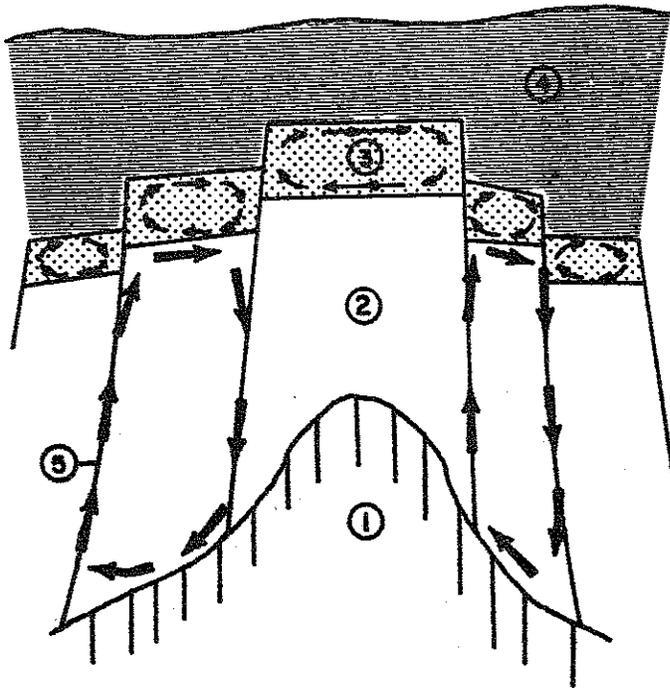
En cuanto a lo que al proceso de la búsqueda se refiere, estos dos casos (especialmente el primero) son similares al caso sedimentario. La presencia de volcanitas en la superficie, es susceptible a ocasionar algunos problemas a causa de las características físicas de este recubrimiento, que puede formar una máscara y constituir un serio problema para el geofísico, especialmente si tiene un espesor considerable.

1. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UN SISTEMA GEOTERMICO (Fig. 1)

1.1 La existencia de un sistema geotérmico de alta entalpía, está ligada a la existencia de condiciones bastante especiales que se pueden resumir de la manera siguiente:

- a) presencia de una fuente de calor que se sitúa a profundidades relativamente escasas (5 a 20 Km), que será la causa de una recia anomalía de flujo térmico. Se piensa en general que esta fuente es de origen magnético.
- b) existencia de reservorios potenciales, bien alimentados, representados por formaciones permeables y situados a profundidades económicamente rentables (generalmente no sobre pasando los 2,000 metros),

FIG. 1



- ① DEEP HEAT SOURCE
- ② LOW PERMEABILITY OR IMPERMEABLE FORMATIONS
- ③ PERMEABLE WATER RESERVOIR
- ④ IMPERMEABLE COVERING
- ⑤ FAULT SYSTEMS

c) debido a la baja conductibilidad térmica de las rocas, no es posible considerar que la transmisión del calor, entre la fuente profunda y las capas acuíferas accesibles desde la superficie, se efectúe por conducción. Se debe pues considerar una transmisión por convección. En el sentido vertical, este fenómeno puede ser posible gracias a sistemas de fallas bastante densas y, en el sentido horizontal, en lo que a depósitos acuíferos se refiere, gracias a la permeabilidad de estos últimos. Por lo tanto es imprescindible suponer la existencia de fallas favoreciendo intercambios térmicos entre la fuente caliente profunda y los depósitos acuíferos.

Por otra parte, estos sistemas de fallas, al crear a su alrededor una permeabilidad secundaria, pueden de la misma manera favorecer el descenso en profundidad de fluidos superficiales, que por consecuencia se recalentarán para volver a subir en un sistema de circulación convectiva.

d) presencia de un recubrimiento impermeable sobre los depósitos que evita su dispersión térmica en las capas superficiales. Dicho recubrimiento favorece, en el seno del depósito, la acción de fenómenos de convección que permiten obtener, a veces a poca profundidad (algunos centenares de metros) un fluido con buenas características termodinámicas. La ausencia de un recubrimiento impermeable sobre un depósito acuífero caliente, permite obtener en la superficie del suelo, un equilibrio agua vapor a una temperatura próxima a los 100°C.

1.2 La fuente de calor

En general se considera que la fuente de calor se debe a intrusiones de origen magnético, en que el vértice se encontraría a profundidades relativamente pequeñas (de 10-15 Km). En cier

tos casos podrá tratarse de una especie de cojín de materiales a alta temperatura, que se puede encontrar en ciertas depresiones ligadas a la formación de un "rift".

En el caso de la geotermia de baja energía, la temperatura del fluido estará simplemente ligada al gradiente geotérmico regional (o a un flujo regional ligeramente anormal). La profundidad de los pozos destinada a captar este fluido será en general de una profundidad importante (> 1,500 m), de manera que se obtengan temperaturas superiores a 60°C. En este tipo de búsqueda, la metodología geofísica se asemeja mucho a la utilizada por la investigación petrolera.

1.3 El Reservorio

Su naturaleza litológica es extremadamente variable: puede tratarse de formaciones tales como calizas dolomíticas, calizas fracturadas, grauwackas fracturadas, esquistos, basaltos, riolitas agrietadas, tobas y brechas, formaciones volcánicas silicificadas y refracturadas, mármoles y esquistos calizos destrozados, etc. o de cualquiera otra formación, que pueda presentar las características de un reservorio (recarga y permeabilidad). El agua almacenada por este depósito es esencialmente de origen superficial. El mecanismo de la alimentación de este depósito debe ser cuidadosamente estudiado. En efecto, en un campo geotérmico no explotado, el sistema convectivo no necesita de una alimentación importante para su funcionamiento (esto, siempre y cuando no se produzcan escapes a través del recubrimiento, o que éstos sean muy pequeños). En el momento mismo en que se dé comienzo a la explotación del campo, el problema de la alimentación del depósito se hará presente.

Otro problema muy importante relacionado con el reservorio es el de su permeabilidad (o de su transmisividad). Este parámetro a menudo condiciona el resultado de una búsqueda, pues

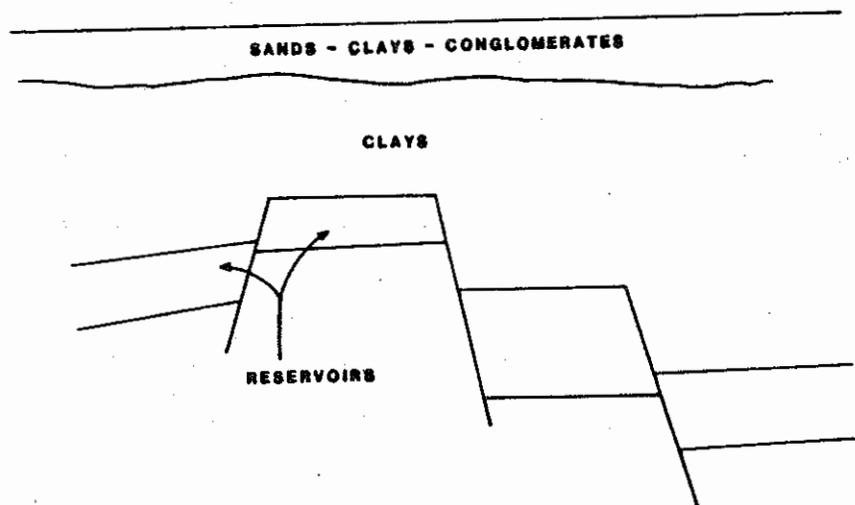
aunque se haya encontrado todos los factores del éxito, la ausencia de permeabilidad en el depósito bastará para que esta búsqueda sea negativa. En el caso de depósitos que tienen una permeabilidad secundaria (por ejemplo: fracturación, grietas, etc., en calizas o en basaltos o riolitas), las zonas permeables son localizadas a menudo en ciertos puntos privilegiados (proximidad de fallas por ejemplo). Fuera de dichas zonas la permeabilidad puede ser débil o nula y el paso de unas a otras se efectúa a menudo bruscamente. La diferenciación entre zonas permeables e impermeables en un conjunto profundamente agrietado, a partir de medidas de geofísica de superficie, no es un problema fácil y en muchos casos ni siquiera puede ser resuelto con los medios que habitualmente se utilizan para la prospección geotérmica.

1.4 Capa sello o cobertura impermeable

Está representado por una formación, en la cual la permeabilidad es débil o nula, que limita o impide los escapes hacia la superficie del fluido almacenado en el reservorio, al igual que la dispersión de la energía térmica de este mismo. Esquemáticamente se pueden identificar dos tipos de recubrimiento:

- a) los sedimentos arcillosos o de arcilla dominante que se han depositado sobre los reservorios, pero que no están vinculados con la actividad geotérmica (Fig. 2). Es el caso por ejemplo de todos los depósitos sedimentarios, tales como: las famosas arcillas "scagliose" de la región de Lardarello, las arcillas y margas miocenas de Kizildere (Turquía), los sedimentos arcillosos de Cerro Prieto (México), etc.
- b) las formaciones que deben su impermeabilidad al fenómeno geotérmico por auto-sello, debido esencialmente a la precipitación de sílice o a materiales de alteración (fenómeno

FIG. 2



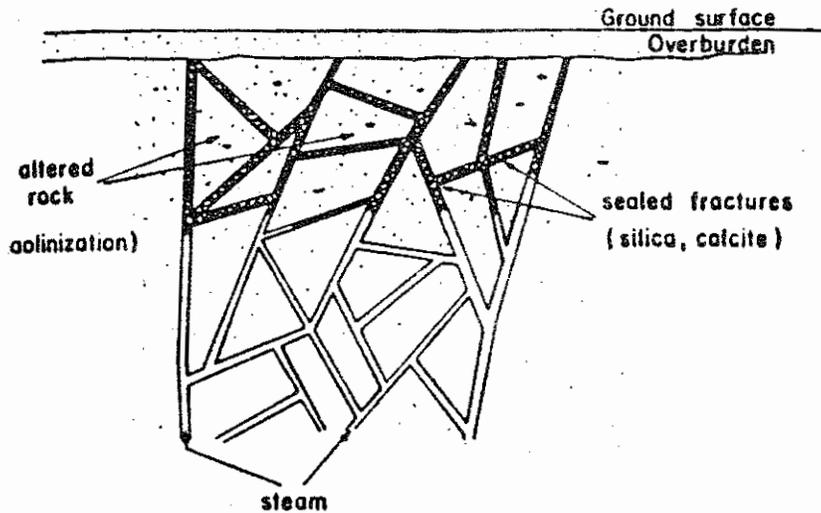
de "self-sealing" - Fig. 3).

Este caso se encuentra por ejemplo en ciertos campos geotérmicos, tales como:

- Los Geysers (USA): perforaciones han recortado grauwackas y basaltos de edad jurásica a cretácica. Las muestras hacen resaltar que en su parte superior, las grietas de estas formaciones están rellenas de sílice (Facca 1965),
- Broadlands (Nueva Zelanda): riolitas hacen el papel de recubrimiento para los reservorios subyacentes. Su permeabilidad tan débil se debe a una fuerte silicificación (Amidley 1970),
- Las Dunas Imperial Valley (USA): depósitos de sílice en las areniscas, constituyen un recubrimiento para salmueras calientes a poca profundidad (300 m) - (Bird y Elders 1974),
- Matsukawa (Japón): la parte superior de las tobas compactas se ha convertido en arcilla. Los minerales de alteración (alunita, caolín, montmorillonita) han contribuido a la impermeabilidad de estas tobas. Existen grietas abiertas en la base de las tobas que representan un depósito geotérmico potencial.
- Otake (Japón): donde lavas con piroxenos alterados en montmorillonita, juegan un papel de recubrimiento sobre tobas y brechas con zeolitas (Yamasaki y al. 1970).

G. Facca (1965 y 1967), definió un "campo geotérmico de auto-sellamiento", como un campo en el cual la actividad hidrotermal ha dado origen a un recubrimiento por trans-

Fig. 3



Cap rock is a resistive or conductive formation where geothermal self-sealing took place.

Duprat and Omnès 1975

formación progresiva de rocas originalmente permeables, a rocas poco o no permeables. Este proceso se efectúa de una manera tal, que estas rocas se convierten por su impermeabilización en una trampa eficaz para las corrientes de convección. Los mecanismos de base del sellamiento son la alteración de las rocas en situ, especialmente por caolinización y el relleno de los vacíos por el depósito de diferentes minerales, siendo los más frecuentes la sílice y la calcita.

De hecho, ambos tipos de recubrimiento pueden existir en un mismo campo. En Broadlands y Wairakei, las capas lacustres de la formación del Salto de Huka, forman un recubrimiento sedimentario impermeable, pero localmente no están presentes. En estos lugares el recubrimiento es del tipo de relleno (Grindely 1970). La distinción entre estos dos tipos de recubrimiento es pues un tanto artificial. Sin embargo, puede ayudar a definir un programa de prospección geofísica.

2. LOS DOMINIOS EN QUE INTERVIENE LA GEOFISICA

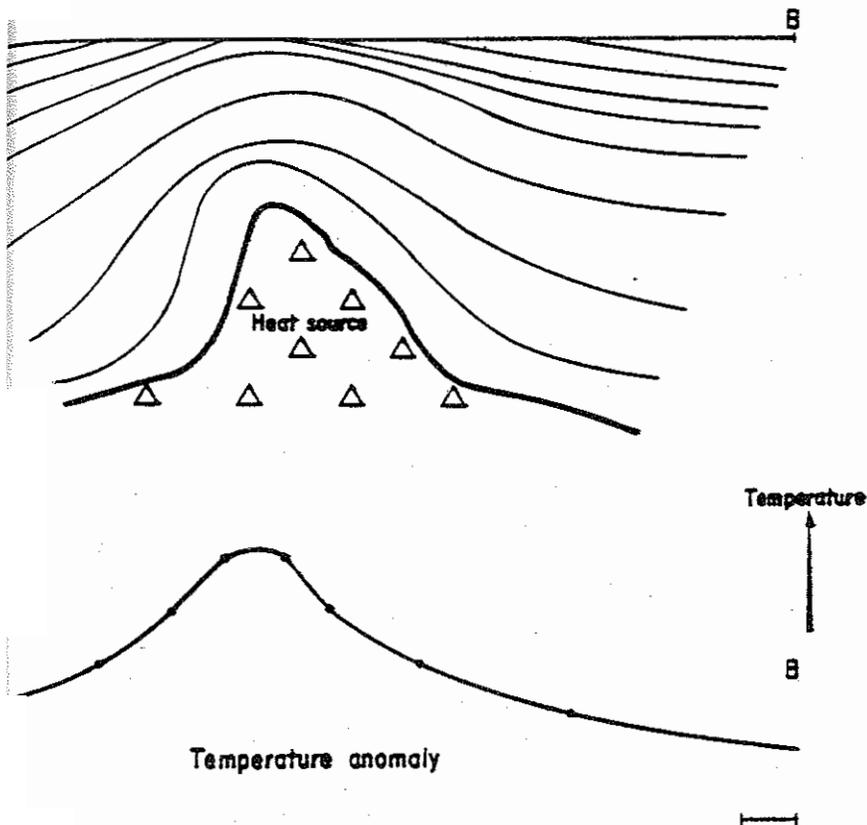
Si volvemos a la Fig. 1, se ve que la geofísica puede intervenir en dos de los puntos de la prospección geotérmica.

2.1 La presencia de una fuente caliente profunda, introduce una deformación en la configuración de las isotermas, que será marcada en las proximidades de la superficie del suelo, por una anomalía de temperatura y gradiente de la misma. Las medidas de temperatura deberían por lo tanto aportar una contribución interesante al conocimiento de un yacimiento geotérmico (Fig. 4).

Si el cuerpo extraño responsable de la fuente de calor posee una composición alcalina y una temperatura inferior a la del

Fig. 4

- Isotherm pattern



punto de Curie (500°C), habrá probablemente una "respuesta" magnética, permitiendo localizarlo y eventualmente dar informaciones sobre su forma y su profundidad. El método magnetotélúrico puede proporcionar algunas veces indicaciones concernientes a la profundidad de tal cuerpo.

2.2 Estudio del reservorio y de su recubrimiento

Generalmente es en la gama de los métodos geofísicos siguientes, que se eligen los que se adaptan mejor a las condiciones geológicas y al problema expuesto:

- gravimetría
- métodos eléctricos (eléctrico, electromagnético, magnetotélúrico)
- sísmica (refracción, reflexión)
- magnetismo (aéreo y en tierra)
- infra rojo (fotos, imágenes)
- medidas de temperatura en pequeñas perforaciones (30 a 100 m), para la determinación del gradiente geotérmico y eventualmente medida de la conductibilidad térmica, sobre muestras obtenidas de estas perforaciones o in situ, en estas mismas perforaciones por el cálculo de flujo de calor.

3. METODOS DESTINADOS A APRECIAR VARIACIONES DE TEMPERATURA

Se pueden incluir:

- el método infra rojo,
- la determinación a partir de medidas aeromagnéticas de la isoterma 520°C correspondiendo al punto de Curie,
- medida de la temperatura del suelo en las perforaciones.

Los dos primeros métodos pueden ser utilizados en la fase prelimi-

nar del reconocimiento regional. Se ponen en obra con medios aéreos (avión - helicóptero). El tercero, que requiere perforaciones, es utilizado más bien por semi-reconocimiento o estudios de detalle.

3.1 El método infra rojo

Su objetivo principal es el de poner en evidencia anomalías térmicas en la superficie del suelo, registrando emisiones de calor del suelo en la banda de los infra rojos. Su profundidad de investigación es muy reducida (algunos decímetros) y por lo tanto, este método permite únicamente localizar anomalías de temperatura que se manifiestan en la superficie del suelo. La causa de estas anomalías sólo podrá ser establecida por un reconocimiento del suelo, de las zonas anómalicas reveladas en avión. En zonas vírgenes, este procedimiento podrá contribuir a hacer ganar tiempo al geólogo, indicándole rápidamente los sectores que necesitan ser verificados.

Se procede generalmente a la ejecución de:

- fotografías a color en la banda del IR cerca del visible (longitud de onda 1 a 2 micrones),
- fotografías a falso color sobre las cuales, la parte infra-rojo representada por un color determinado, está asociada a fotografías tomadas simultáneamente en otro dominio del espectro. Tales documentos pueden poner en evidencia variaciones de temperatura del suelo debidas a diversos fenómenos, tales como: cambios de la naturaleza del suelo, presencia de vegetación, fuentes calientes, etc.,
- registro de imágenes infra rojo con la ayuda de un equipo de exploración (Scanner), en una banda de longitudes de ondas más elevadas: 3 a 5 μ , 8 a 14 μ . Esta última banda es

más sensible que la precedente y está mejor adaptada a la puesta en evidencia de las anomalías de baja amplitud (precisión de 0,01°C en la medida de la temperatura). Se registran simultáneamente la temperatura y las variaciones de temperatura,

también se han realizado grabaciones (Hodder, 1970), con longitudes de ondas más elevadas, iguales a 1,58 y 1,875 cm (dominio de las micro-ondas). La profundidad de investigación es más importante (algunos metros) y estas medidas es tan menos afectadas por las variaciones de temperatura en la superficie del suelo. Sin embargo la presencia de suelos húmedos reduce esta profundidad. En la práctica, no parece que en el cuadro de la búsqueda geotérmica estos registros presenten ventajas sensibles en relación a los precedentes (8-14 μ).

Para que las medidas sean absolutamente comparables, deben ser tomadas en condiciones idénticas, es decir, en la misma época y en las mismas horas, de manera que los efectos de la variación diurna se reduzcan al mínimo. Generalmente es al alba o a la hora que precede al alba el momento más favorable.

Se puede igualmente considerar la posibilidad de repetir las medidas en diferentes momentos o en diferentes épocas (verano, invierno), para poner mejor en evidencia ciertos fenómenos térmicos.

El estudio de la variación diurna, que permitiría corregir registros efectuados en horas diferentes, necesitaría la ejecución de por lo menos cuatro registros o fotografías repartidas a intervalos regulares en las 24 horas.

La interpretación de los datos así recopilados, es muy de-

Fig. 5

licada cuando se desea utilizarlos en la búsqueda geotérmica. En efecto, es muy difícil separar las anomalías ligadas al fenómeno geotérmico, de las que se deben a causas exteriores (geología, vegetación, etc.). Casi no se puede utilizar este procedimiento en regiones provistas de una espesa vegetación. Sin embargo, algunos datos podrían ser proporcionados acerca de los flujos de agua caliente en los ríos (esto, esencialmente en un ambiente volcánico).

Su aplicación en prospección geotérmica parecería limitarse al reconocimiento en zonas vírgenes (sin mucha vegetación), donde no se ha efectuado aún ningún reconocimiento, o bien, para controlar los efectos de la explotación sobre las manifestaciones termales de un campo.

5.2 Determinación de la profundidad del punto de Curie

En este método de reconocimiento regional, se determina la profundidad a la cual las rocas de la capa terrestre dejan de ser magnéticas, o más exactamente, la profundidad a la cual la magnetita contenida en estas rocas, pasa del estado ferromagnético al estado paramagnético, bajo el efecto de la temperatura.

La figura 5 muestra de una manera simplificada, la variación de la susceptibilidad magnética mediana de la corteza terrestre en función de la profundidad. A la izquierda está representada la temperatura en función de la profundidad. Se nota un cambio brutal en la susceptibilidad magnética, cuando la temperatura está incluida entre 500°C y 520°C. Si se puede estimar la profundidad a la cual las rocas dejan de ser ferromagnéticas, entonces es posible trazar un mapa de la profundidad del punto de Curie. Esta superficie representa la isoterma 500°C.

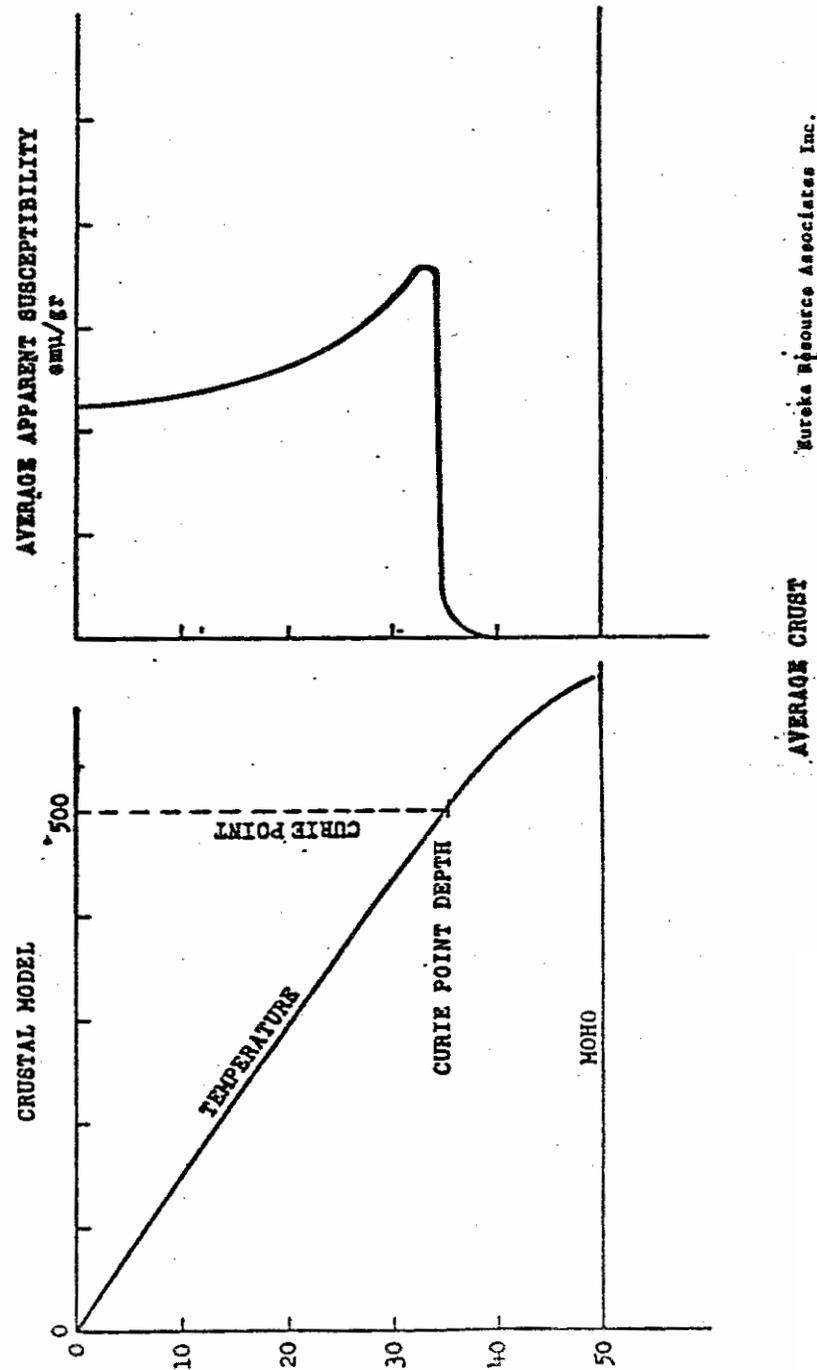


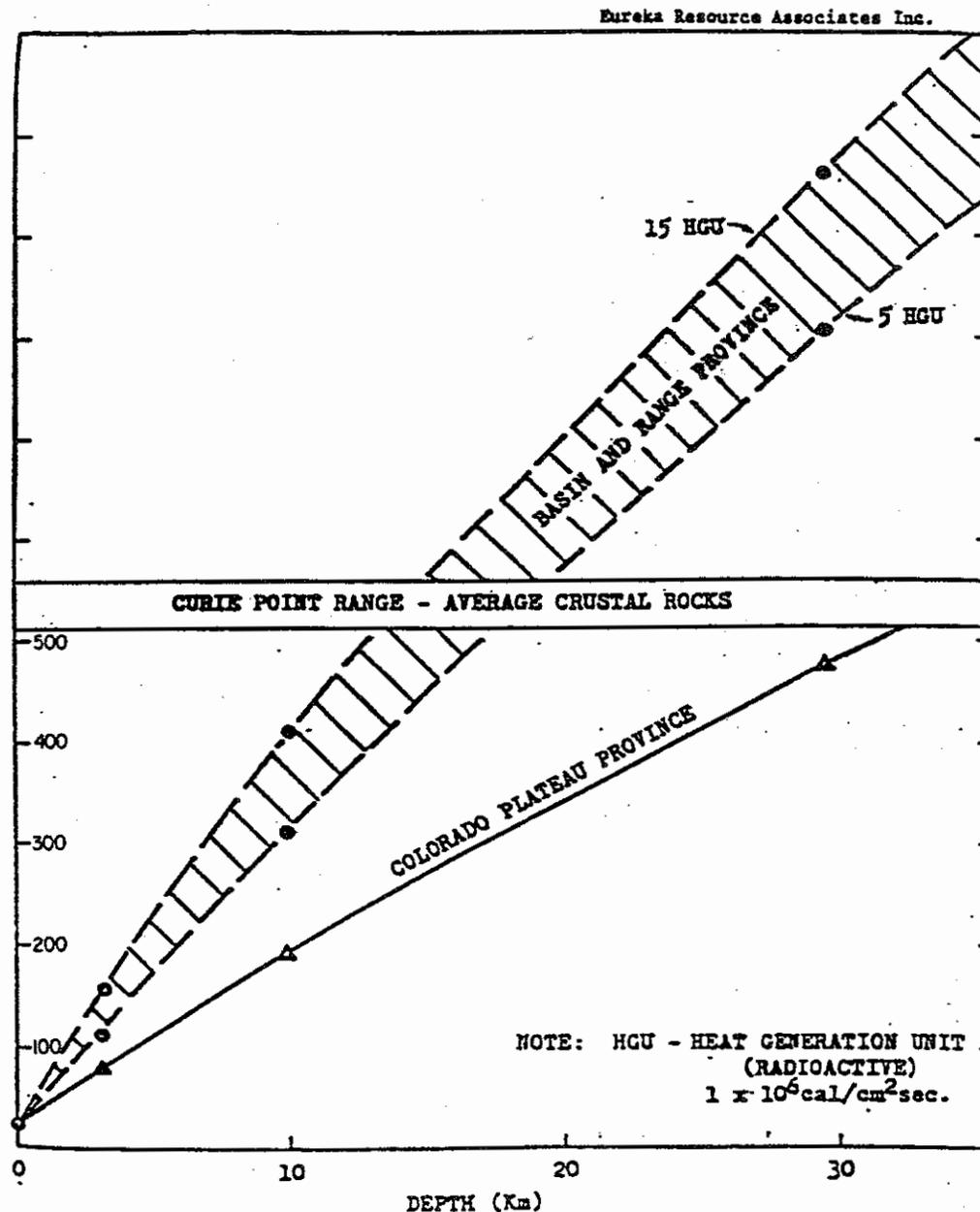
Fig. 6

La profundidad del punto de Curie es de un promedio de 35 Km, pero varía considerablemente según sea la contextura geológica. En Estados Unidos, por ejemplo, es de aproximadamente 35 Km en la provincia de la Meseta del Colorado; se reduce a 18 Km en la provincia del Basin y Range (Fig. 6), e incluso a menos de 10 Km en la zona geotérmica del Parque Yellowstone.

Como este método está basado en las propiedades magnéticas de las rocas, se estudian los perfiles magnéticos registrados durante un levantamiento aéreo, realizado a una distancia constante del suelo (300 m o más), con el objeto de reducir el ruido de origen topográfico. El procesamiento digital es complejo. Se distinguen seis etapas principales:

- un procesamiento que consiste en eliminar las altas y bajas frecuencias parásitas,
- una división de la zona estudiada en bloques, incluyendo 16 X 16 puntos, por los cuales se hace pasar una superficie cuadrática en forma adecuada,
- el cálculo de la transformada de Fourier de esta superficie,
- el cálculo del centro de un paralelepípedo que produce una anomalía magnética, en que la transformada de Fourier es idéntica a la calculada por la superficie cuadrática,
- el cálculo de la profundidad del techo del paralelepípedo,
- el cálculo de la profundidad de la base y el trazado del mapa de la profundidad de la isoterma 500°C.

En el Parque de Yellowstone (USA), región de gran actividad geotérmica, la profundidad del punto de Curie es muy pequeña, localmente inferior a 6 Km.



3.3 Registros de temperatura en pozos someros

Cuando se tiene interés en localizar zonas calientes, es natural tratar de medir un parámetro directamente ligado al mismo fenómeno: la temperatura. Esta medida puede realizarse de dos maneras:

1) En la superficie del suelo en pequeñas perforaciones de 1 a 2 m de profundidad. En este caso los valores obtenidos no parecen significativos del fenómeno profundo, porque están influenciados por varias causas exteriores, tales como la variación diurna, la vegetación, los microclimas, la exposición de las perforaciones, etc.. Numerosas correcciones son entonces necesarias para hacer comparables entre ellas las diferentes medidas.

Este proceso es también utilizado durante levantamientos aéreos por imágenes infra rojas, para conocer las variaciones de temperaturas en el suelo durante el período de los vuelos.

2) En pequeñas perforaciones, con profundidades por lo menos de una treintena de metros, profundidad a la cual las variaciones superficiales de la temperatura producen ínfimos efectos. Los captadores de temperatura (termistancias, resistencias al platino, etc.), generalmente son colocados a tres profundidades diferentes, de manera que permita el cálculo del gradiente geotérmico (5 a 20 m entre captadores, según la profundidad de la perforación).

Esta puesta en obra es sin lugar a dudas preferible a la precedente, y es la que se utiliza más frecuentemente durante las búsquedas geotérmicas. Sin embargo, ciertas condiciones esenciales son necesarias para que estas medidas conserven una significación:

- a) ausencia de formaciones permeables acuíferas o susceptibles de serlo, en la superficie del suelo o a pequeña profundidad. Si éstas existieran, sería entonces necesario atravesar y taparlas (tubaje y cimentación), de manera que los captadores queden localizados en depósitos homogéneos e impermeables que podrían existir debajo;
- b) las formaciones representando el recubrimiento del depósito deben tener en su conjunto, una composición litológica relativamente homogénea, de manera que la extrapolación del gradiente en profundidad, permanezca representativa, en lo posible, y que no sea influenciada como consecuencia de cambios de conductibilidad calórica.
- c) los captadores de temperatura deben estar colocados en capas representativas del recubrimiento;
- d) sería preferible no acercarse a los índices de superficie (agua caliente, fumarolas), pues su influencia daría una idea errónea del valor del gradiente.

Para cada perforación se establece un corte geológico con la ayuda de los "cuttings" recogidos durante la perforación. Se puede igualmente sacar muestras de los terrenos comprendidos entre las profundidades previstas por los captadores. Medidas de conductibilidad calorífica sobre estas muestras podrán llevarse a cabo en los laboratorios, permitiendo calcular el valor del flujo de calor, una vez que se logren las medidas del gradiente. La medida de conductibilidad puede efectuarse, igualmente in situ en la perforación (Sestini, 1970). Este procedimiento no se ha generalizado aún en la prospección geotérmica.

Es también interesante efectuar diagraffias en estas pequeñas perforaciones:

- el perfilaje eléctrico (con polarización espontánea), que permitirá precisar el corte litológico y dar una idea acerca de la homogeneidad de los terrenos atravesados;
- la medida de la radiación gama natural, cuya utilización es interesante especialmente cuando no se toman medidas sistemáticas de conductibilidad calorífica sobre muestras (o in situ). En formaciones generalmente arcillosas, que en un medio sedimentario constituyen el recubrimiento del depósito, la radiación gama aumenta con la proporción de arcilla. Esto no deja de ser interesante, puesto que, la conductibilidad calorífica depende del contenido más o menos importante en elementos arcillosos.

Esquemmatizando, para las necesidades de la prospección, se puede admitir que para un mismo flujo de calor, el gradiente es mucho más elevado cuanto más importante es la proporción de arcilla. Esto es más bien una aproximación, ya que variaciones de flujo sobre una zona bastante extensa, pueden alterar toda corrección. Sin embargo, sucedió que en prospecciones de esta naturaleza, el examen de los registros de radiación gama, permitió corregir ciertos gradientes para hacerlos más comparables a un modelo de la radiación gama tomando como base:

- el registro continuo de la temperatura efectuado alrededor de una hora después de haber terminado el sondeo (estabilización del lodo). Aunque en forma aislada no tenga gran significado, teniendo en cuenta el corto período del tiempo que lo separa del final de la perforación, puede aportar algunas informaciones preliminares acerca del valor de la temperatura, en particular para los niveles más profundos alcanzados por el sondeo.

Después de examinar los datos reunidos al final del sondeo, los captadores, en grupos de tres, son colocados en las profun-

didades elegidas. Las medidas se toman diariamente durante varios días, hasta que se puede observar en cada uno de los captadores una estabilización de la temperatura medida. En general, 8 días es el mínimo de tiempo durante el cual las medidas deben ser ejecutadas. Diez a quince días o más son a veces necesarios. La figura 7 da un ejemplo de medidas efectuadas en un sondeo de 100 m de profundidad (Denizli - Turquía), donde los captadores son colocados a 60-80 y 100 m de profundidad. Puede apreciarse que no es sino a partir del octavo día que la temperatura se ha estabilizado.

El conjunto de las informaciones recogidas (diagráfias y temperaturas) para cada sondeo, puede ser agrupado en un documento único (Fig. 8).

A partir de los gradientes así medidos, se pueden establecer mapas de isogradiante representando las variaciones observadas. En la figura 9 se reporta un mapa trazado a partir de medidas efectuadas en Italia en la región de Radicofani (Burgassi et Al., 1970). Se trata de un campo de tipo sedimentario, donde el recubrimiento está representado por sedimentos terciarios esencialmente arcillosos tapando un depósito de calizas. Localmente (al oeste de Piancastagnaio), estas arcillas están cubiertas por ignimbritas y lavas (plio-cuaternario) de poco espesor. La profundidad media de los sondeos es de 35 m y los captadores están colocados a 25, 30 y 35 m de profundidad. El valor del gradiente está comprendido entre 0,5 y 4,5°C/10 m los valores más elevados se sitúan alrededor de Piancastagnaio, donde se encuentra el mayor número de pozos profundos de explotación productivos.

Medidas de conductibilidad calorífica efectuadas sobre muestras extraídas en los pequeños sondeos, han mostrado que el 78% de estas medidas estaban comprendidas entre 4 y 5×10^{-3} cal/cm/°C; esto indica una gran homogeneidad del recubrimiento arcilloso

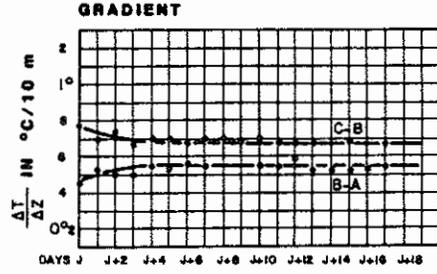
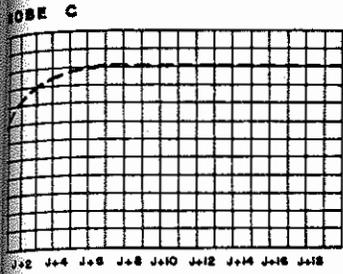
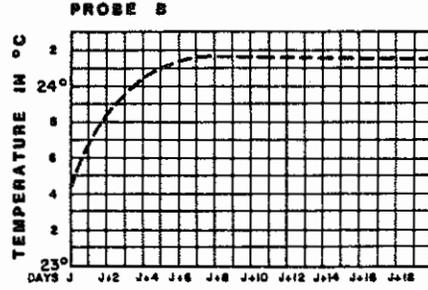
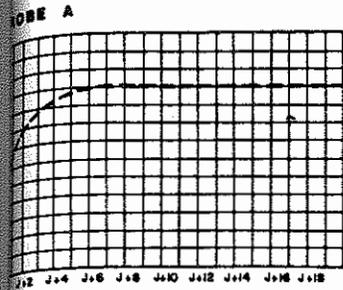


Fig. 7 THREE PROBES A, B, AND C ARE PLACED RESPECTIVELY AT 60, 80, AND 100 m IN ORDER TO MEASURE THE EVOLUTION OF TEMPERATURE AFTER THE COMPLETION OF THE HOLE. THE ABOVE CURVES SHOW THAT TEMPERATURE WAS STABILIZED ONLY AFTER THE 8th DAY.

Fig. 8 ALL LOGS FROM A HOLE ARE PRESENTED TOGETHER. FROM RIGHT TO LEFT: GEOLOGICAL SECTION, S. P., RESISTIVITY, GAMMA RAY, TEMPERATURE, GRADIENT

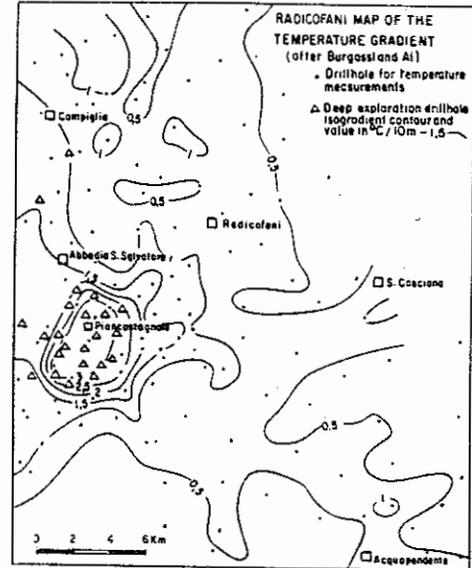
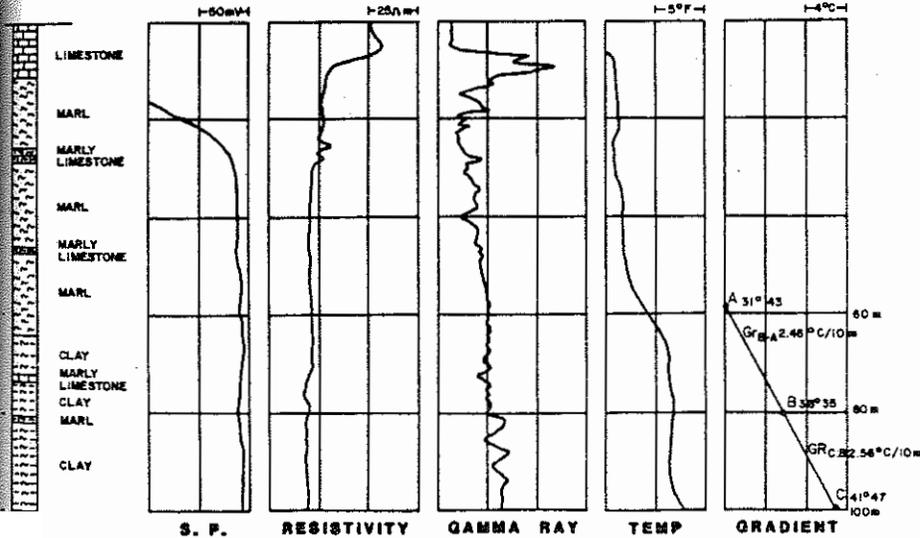


Fig. 9 - Isograd contours in the Radicofani area (ITALY)

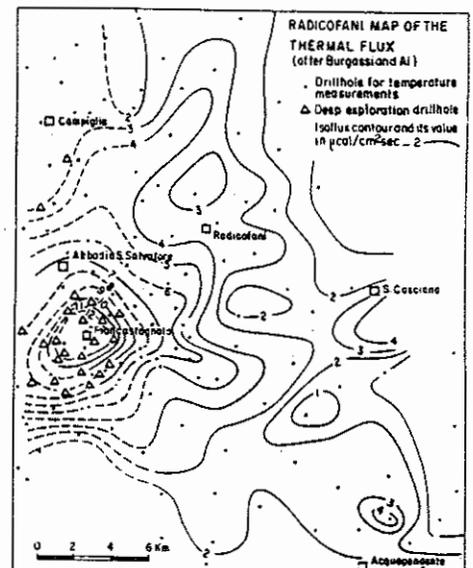


Fig. 10 Contours of equal thermal flux in the Radicofani area. The thermal flux is calculated by using the measurements of thermal gradient and thermal conductivity. Note the similarity of the contours with contours on Fig. 9

en la faja estudiada. A partir de los valores así obtenidos (gradiente y conductibilidad), se ha podido trazar un mapa de flujo de calor (Fig.10), cuyos rasgos esenciales son absolutamente comparables a los del mapa de gradiente. Esto se explica por el hecho de que la conductibilidad del recubrimiento no varía sino dentro de pequeños límites. Sin embargo, en detalle se puede notar que sobre este mapa aparece (norte-este de Radicofani) una zona donde el flujo es más elevado que la media general.

Se puede apreciar que tales mapas representan un elemento de información muy interesante, aunque no sea por sí mismo determinante para toda prospección geotérmica. Por cierto, su interpretación debe ser efectuada teniendo en cuenta indicaciones aportadas por los otros métodos geofísicos puestos en obra (particularmente en lo que concierne a la profundidad probable del depósito).

MÉTODOS GEOFÍSICOS QUE PERMITEN LA DETECCIÓN DE ESTRUCTURAS O DE ANOMALIAS POTENCIALMENTE FAVORABLES

4.1 La magnetometría aérea

Se trata de un método de reconocimiento regional.

Es importante en la exploración geotérmica la detección de las fallas, de los horsts enterrados y de los grabens, por lo tanto, parece que la magnetometría aérea debería ser incluida en los programas de exploración, particularmente cuando una serie sedimentaria recubre directamente un basamento cristalino.

Actualmente, en condiciones geológicas favorables, la precisión de las estimaciones de profundidad obtenidas por la interpretación de medidas magnetométricas aéreas de alta sensibilidad,

es comparable a la obtenida por métodos tales como la sísmica de refracción. A título de ejemplo, la figura 11 representa el histograma de las desviaciones, entre las estimaciones de profundidad obtenidas a partir del aeromagnetismo y las proporcionadas por la interpretación de medidas con sísmica de refracción. Esta estadística está basada en 78 valores.

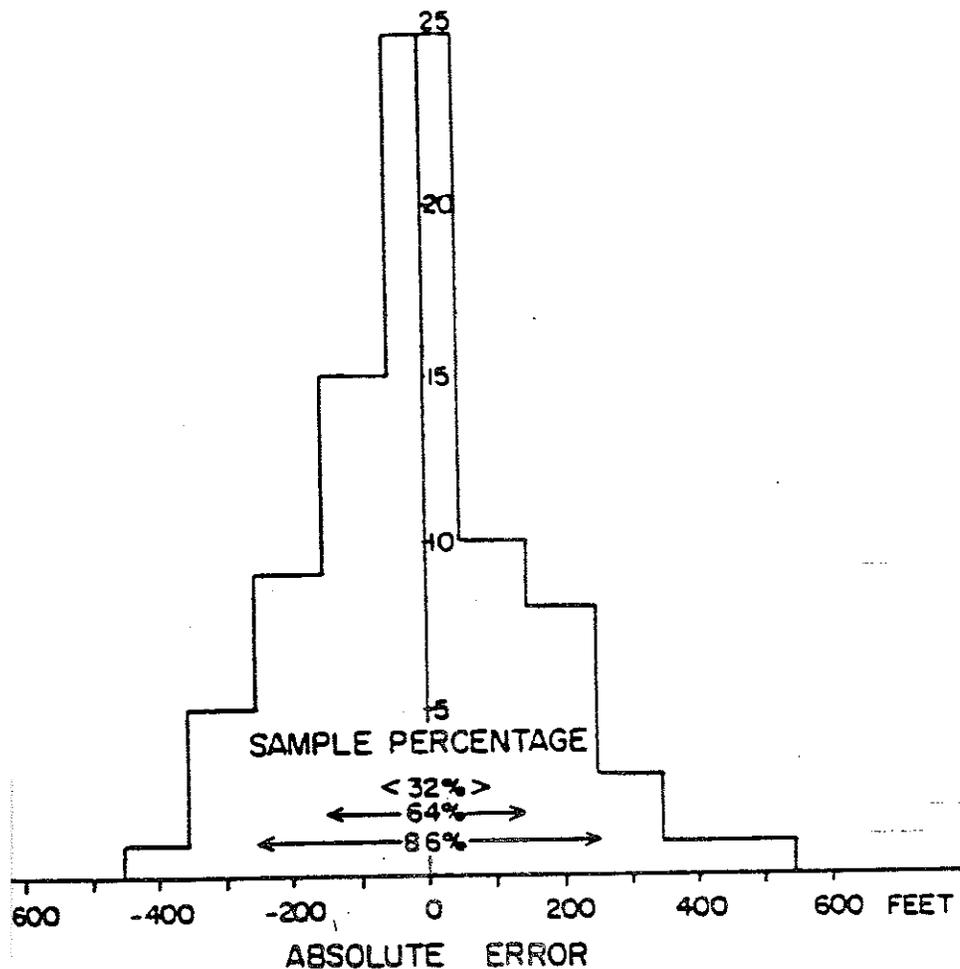
Una comparación entre las profundidades obtenidas por perforaciones y por interpretación de las medidas aeromagnéticas de alta sensibilidad, ha sido efectuada en una cuenca de poca profundidad en Canadá (Deguen et Al. 197). Para 8 sondeos de un grupo de 12, la diferencia entre las dos determinaciones es inferior a un 10%.

Las especificaciones para un estudio magnetométrico aéreo de alta sensibilidad son muy estrictas y el costo para un estudio de esta naturaleza es netamente más elevado, que el de un estudio de sensibilidad corriente. Las especificaciones usuales son las siguientes: vuelo a altitud barométrica constante, distancia del suelo reducida, malla densa (800 m X 400 m), medida del campo total al 1/100 o al 2/100 de γ , para asegurar una precisión práctica de 1/10 de γ ; observación digital cada 0,5 segundo; navegación precisa basada sobre mosaico y doppler (el error en el posicionamiento debe ser inferior a 30m); grabaciones y sustracción de la variación diurna.

La interpretación cuantitativa de las medidas permite trazar un mapa de isobatas del basamento magnético, donde se ponen en evidencia los movimientos que lo afectan (grabens, horsts,...). Permite también delimitar y estimar la profundidad de los niveles magnéticos interstratificados.

La interpretación cualitativa proporciona las informaciones complementarias siguientes: extensiones de los niveles volcánicos interstratificados, presencia de intrusivos cuya tempera

Fig. 11



Basement depth comparison: magnetic and seismic, 78 samples. (After J. Deguen et al.)

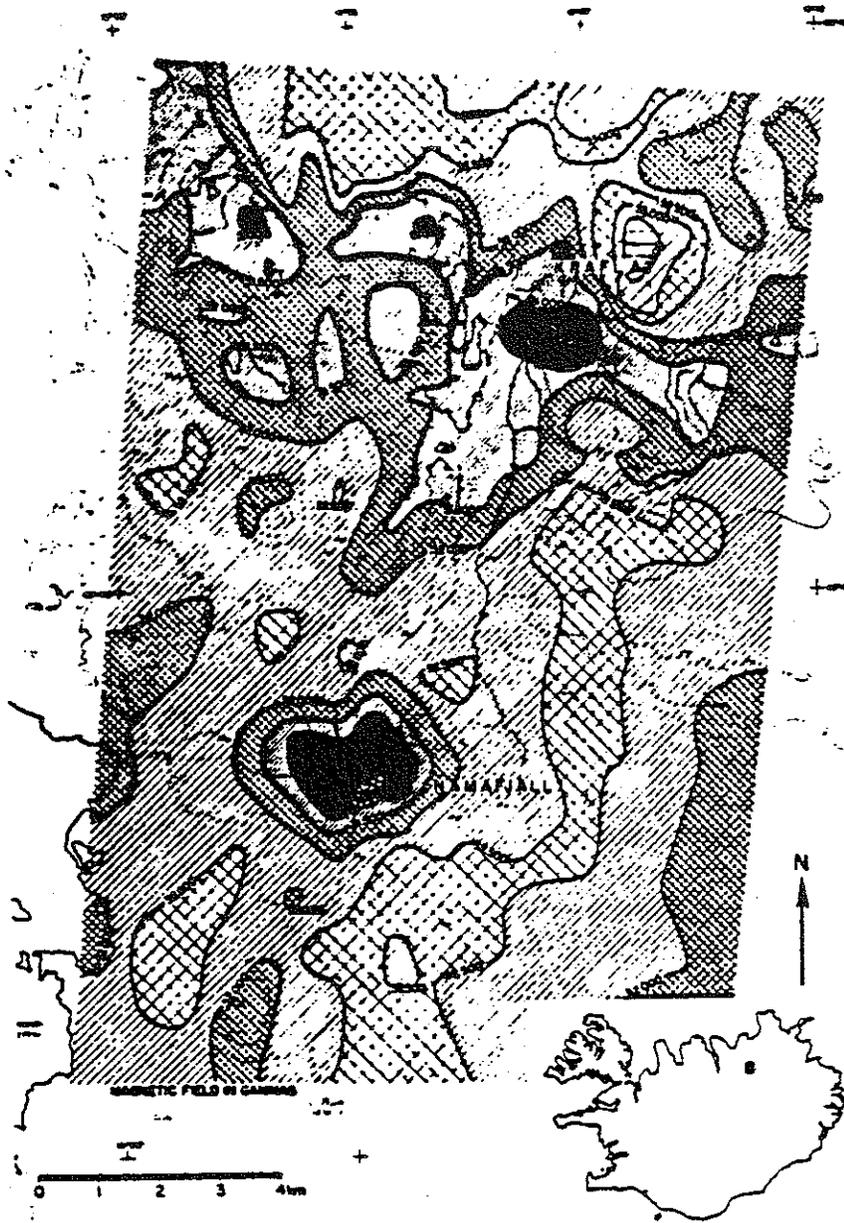
tura es inferior a la temperatura del punto Curie (500°C), diferenciación petrográfica del basamento (cartografía geológica), puesta en evidencia de zonas de alteración hidrotermal ligadas a la presencia de un campo geotérmico (esta zona es a menudo caracterizada por la transformación de la magnetita en pirita, es decir por una susceptibilidad magnética menor que la de las rocas sanas).

Medidas efectuadas en Nueva Zelandia sobre muestras de roca volcánica alterada, sacadas de la profundidad en los sondeos del campo de Broadlands (Hochstein y Hunt, 1970), han demostrado que su susceptibilidad magnética era muy baja. Contrariamente, las muestras de roca sana tomadas a poca profundidad muestran una susceptibilidad magnética mucho más alta. Parecería que la transformación de las rocas hubiera disminuido sensiblemente su susceptibilidad magnética debido a la acción hidrotermal. En un contexto volcánico este fenómeno podría valorizar el método aeromagnetico, que podría permitir localizar, en gran escala, sectores cuya susceptibilidad magnética sería, en su conjunto, más baja y en que las posibilidades de encontrar zonas de alteración hidrotermal serían mayores (Fig. 12).

Esto por supuesto no sería más que una forma bastante aproximada de enfocar el problema, pero que en casos particulares podrían (extensos estudios de reconocimiento - accesos y circulación difíciles) ser muy útiles (localización de zonas para estudios en tierra, indicaciones tectónicas y de profundidad del basamento magnético). Los reconocimientos aeromagnéticos y por imágenes infra rojo, pueden eventualmente ser simultáneamente efectuados.

4.2 El magnetismo terrestre (medida del campo total o de la componente vertical del campo magnético)

Fig.12



An aeromagnetic map of the Námafjall and Krafla high-temperature fields in northern Iceland, showing negative anomalies associated with the hydrothermal fields (survey by Th. Sigurgeirsson).

Este método es casi exclusivamente usado en medios volcánicos, o para la detección de intrusiones volcánicas en series sedimentarias. Debe considerársele como un método complementario. La rapidez con que son efectuadas las medidas y el bajo costo de la operación, justifican ampliamente la aplicación de este método, cada vez que le sea posible proporcionar una indicación positiva. Actualmente se carece de antecedentes para estimar su eficacia en la búsqueda geotérmica. Se espera que los estudios al futuro puedan ser concluyentes a este respecto.

4.3 La gravimetría

Este método intensamente utilizado en la búsqueda petrolera, encuentra un campo de aplicación en el estudio de los campos geotérmicos. Se utiliza al estado de reconocimiento general y su propósito principal es el de aportar informaciones sobre la tectónica regional. Debe permitir especialmente dar una idea de los rasgos estructurales esenciales, tales como fallas y estructuras subterráneas. Aunque este método tenga sobre todo un carácter cualitativo, se puede por ejemplo, con la ayuda de ábacos bilogarítmicos o por el análisis matemático de las anomalías dar una estimación, no desprovista de interés, de la profundidad de las formaciones, representando el objetivo de la búsqueda geotérmica. Por ejemplo en el caso de un recubrimiento arcilloso, que limita un acuífero representado por calizas o por el basamento metamórfico (Kizildere en Turquía), la gravimetría puede permitir el determinar la naturaleza del basamento y estimar localmente su profundidad.

En un medio volcánico, el empleo del método gravimétrico con fines estructurales, es probablemente menos sistemático que en un medio sedimentario. Sin embargo, su uso tiende a desarrollarse porque a menudo aporta elementos complementarios, permitiendo interpretar mejor el otro (o los otros) método geo

físico que fueron puestos en práctica.

Este método ha sido utilizado también en Nueva Zelanda (Hochstein y Hunt, 1970) para estudiar la repartición de las zonas de alteración hidrotermal, ligadas a un campo geotérmico en formaciones volcánicas. Dichas zonas han aparecido en los documentos gravimétricos (segunda derivada), bajo la forma de anomalías positivas (densidad más fuerte que la de los terrenos que encajonan).

Por último señalemos que ciertos yacimientos de tipo "auto-sello" están asociados a una anomalía gravimétrica positiva, probablemente ligada al fenómeno de relleno por la sílice, que aumenta localmente la densidad de ciertas formaciones. Por ejemplo las areniscas silicificadas que representan el recubrimiento del yacimiento de dunas, tienen una densidad de 2,6 en relación a 2,25 para las areniscas no silicificadas.

Los documentos que se pueden obtener a partir de las medidas gravimétricas se presentan bajo dos formas:

- un documento de base que es el mapa de la anomalía de Bouguer, resultado directo de las mediciones efectuadas en el terreno, corregidas de las variaciones de altitud de los puntos y efectos del relieve cercado el punto de medida, establecida por una densidad de los terrenos de superficie;
- un documento resultante del primero, del cual se quiere eliminar el efecto de la anomalía regional en la zona prospectada. Este documento puede ser establecido, ya sea directamente por el cálculo (mapa de la segunda derivada) o después de haber trazado una anomalía gráfica (lo cual permite tener en cuenta los efectos geológicos conocidos), que se sustrae luego de la anomalía de Bouguer. Se obtiene así un mapa de la anomalía residual a partir del cual se puede intentar una

interpretación cuantitativa con la ayuda de ábacos biogariánicos y de modelos matemáticos, para ciertas estructuras.

4.4 La sísmica-refracción

Este método es definitivamente más caro que la gravimetría y el magnetismo aéreo de alta sensibilidad. Por ejemplo 1 Km² de perfil sísmico, con 1 Km entre perfil, cuesta 13 veces más caro que un estudio magnético de alta sensibilidad de malla 400 X 800 m de la misma superficie. Parece, por lo tanto, que se debe restringir su empleo al estudio de detalle de estructuras interesantes reveladas por un método de reconocimiento menos caro, o bien, cuando el estudio de un nivel conocido es necesario, en la medida en que este nivel presente un contraste de velocidad suficiente.

Su empleo está además limitado a los casos en que las velocidades de los terrenos crecen con la profundidad ($V_1 < V_2 < V_3 \dots < V_n$). La puesta en evidencia en terrenos de velocidad más lenta, comprendida entre dos terrenos más rápidos, sólo podrá hacerse en el caso en que su espesor sea importante en relación al terreno que yace encima. No se puede decir que se trate de un método corrientemente empleado en la prospección geotérmica. Su utilización no es considerada sino en casos especiales.

4.5 La sísmica-reflexión

Este método es intensamente utilizado en la búsqueda petrolera. Su empleo en prospección geotérmica puede ser considerado en la medida en que, la puesta en evidencia de estructuras favorables a la existencia de una reserva geotermal se asemeje considerablemente a la de la puesta en evidencia de una reserva de hidrocarburos.

Las observaciones siguientes hacen que su empleo no sea generalizado en prospección geotérmica:

- su costo relativamente elevado, teniendo en cuenta el tamaño reducido de los estudios (en comparación a los estudios petroleros),
- la mediocre calidad de los resultados generalmente obtenidos en un medio volcánico (cf. Fig. 13),
- la dificultad de trabajo en áreas de topografía accidentada.

No obstante, teniendo en cuenta su calidad y sus posibilidades, el método no debe ser descartado. En un medio sedimentario en particular, se puede estimar que ningún otro método geofísico posee un poder separador comparable al de la sísmica-reflexión (ver un ejemplo de documento obtenido en la figura 14). Para problemas de objetivo profundo (1500 - 2000 m), la inversión necesaria para efectuar perforaciones, justifica el hecho de que un método de costo elevado pueda estar puesto en obra.

Por otra parte la sísmica-reflexión ofrece posibilidades interesantes para el estudio petrofísico de un yacimiento:

1) En general los estudios sísmicos se interesan en las ondas de compresión (ondas P). Con la ayuda de fuentes especiales es posible generar desde la superficie ondas transversales (ondas S.). El registro de ondas P y S permite obtener velocidades longitudinales (V_p) y transversales (V_s). Las variaciones de la relación de estas velocidades ($\gamma = \frac{V_s}{V_p}$), son representativas de los cambios petrofísicos del terreno que ellas caracterizan. Estas variaciones se podrán seguir a lo largo de una sección sísmica al nivel de las capas presentando interés para la búsqueda. Por ejemplo, cambios en el grado de fractu-

COULEE VOLCANIQUE

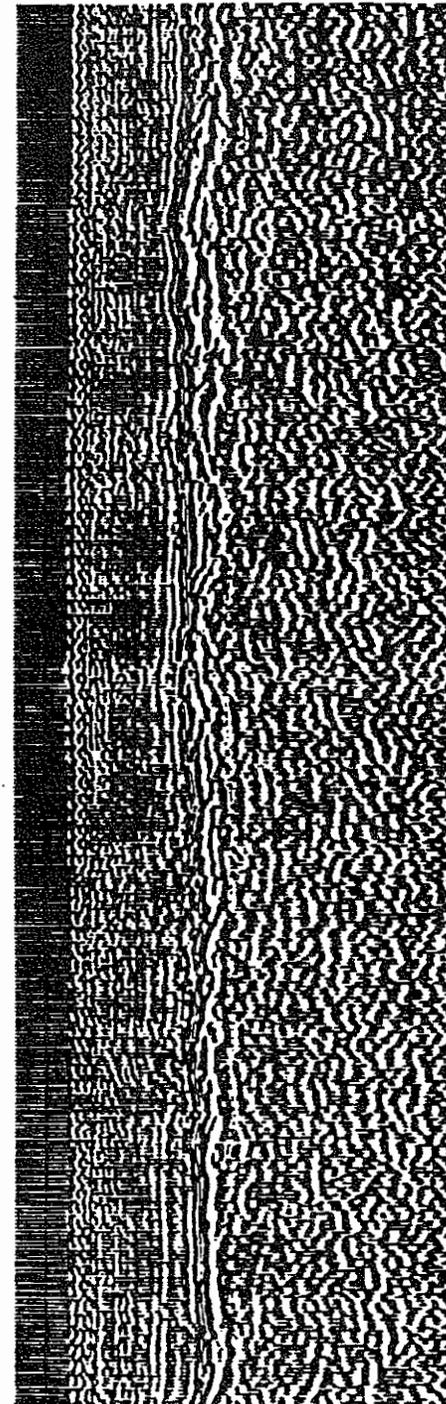
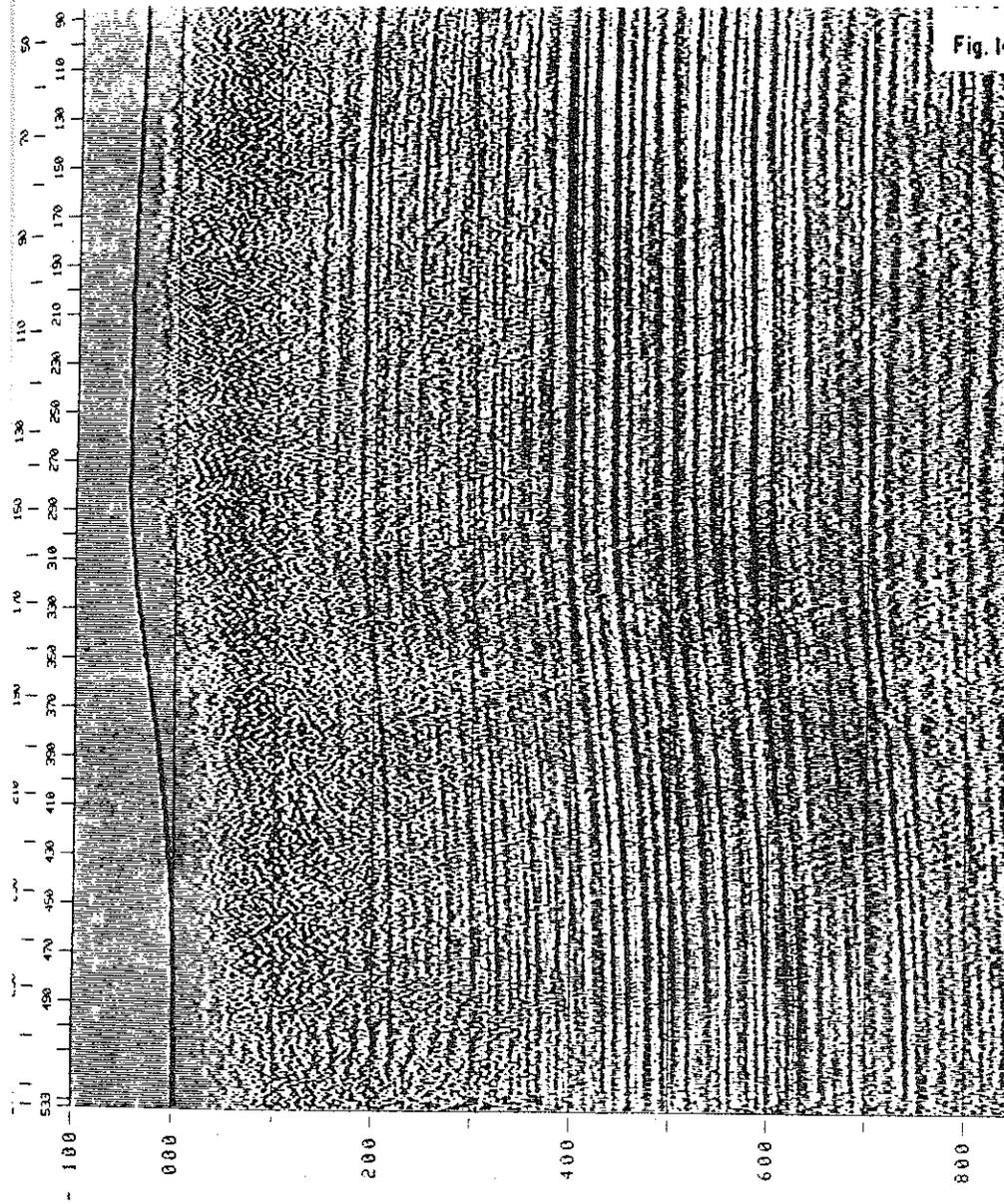


Fig. 13



ración de un reservorio en calizas, o en la porosidad de una formación, se reflejarán en variaciones del valor γ .

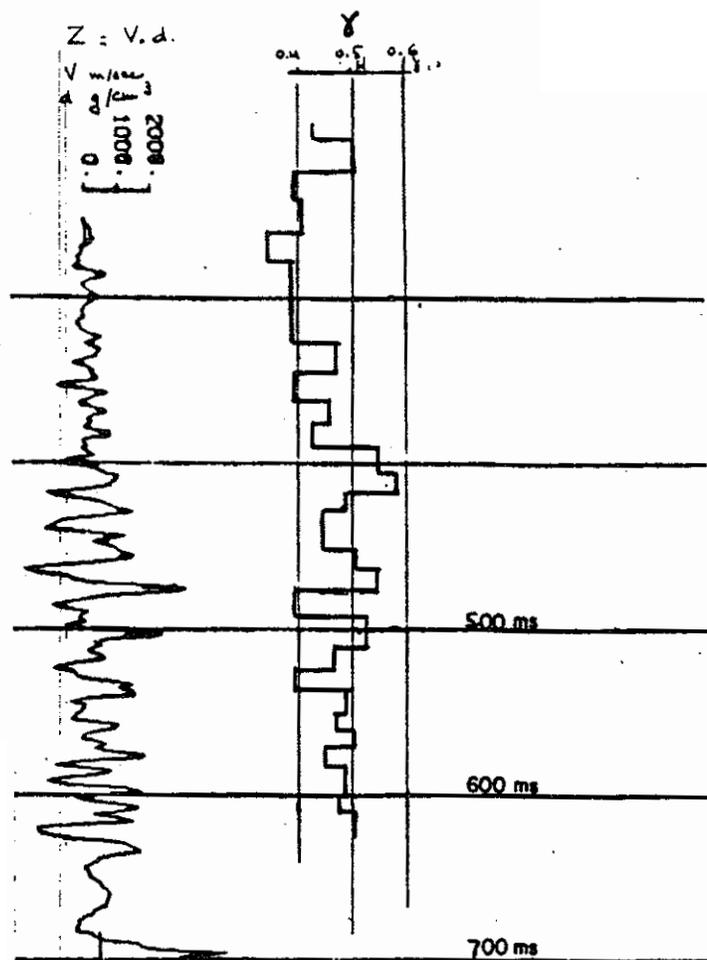
La obtención de registros de ondas S de buena calidad, necesitan una puesta en obra bastante pesada sobre el terreno de condiciones geológicas favorables y muchas precauciones en la implantación de los dispositivos en tierra.

2) Se podrá estudiar igualmente las variaciones de impedancia acústica (producto velocidad-densidad) de una formación a lo largo de una o varias secciones sísmicas. Esto requiere que en el sector estudiado por sísmica, se encuentre al menos un sondeo, habiendo alcanzado o atravesado el objetivo a estudiar y que en este sondeo, diagragfías sónica y de densidad hayan sido realizadas. Se podrá así construir un "log" de impedancia que permitirá pasar, por comparación de los datos sísmicos, a secciones coloreadas, donde aparecerán los diferentes niveles, a lo largo de los cuales se podrán seguir las variaciones eventuales de las impedancias. Con la ayuda de los datos geológicos, litológicos, de facies; y comparando con los resultados obtenidos en la perforación, éstas variaciones podrán ser traducidas en términos de tendencia los cambios de las características del nivel considerado. Este proceso es ampliamente utilizado para el estudio de yacimientos de hidrocarburos.

La figura 15 da un ejemplo de "log" de impedancia Z y de un "log" γ , construídos a partir de registros efectuados en una perforación.

3) Estudios sísmicos 3D (3 dimensiones), permitirán igualmente estudiar con gran precisión la geometría y el comportamiento de un yacimiento. También es posible determinar variaciones verticales y horizontales en un reservorio, lo mismo que accidentes menores que podrían afectarlo pueden igualmente ser

Fig. 15



detectados.

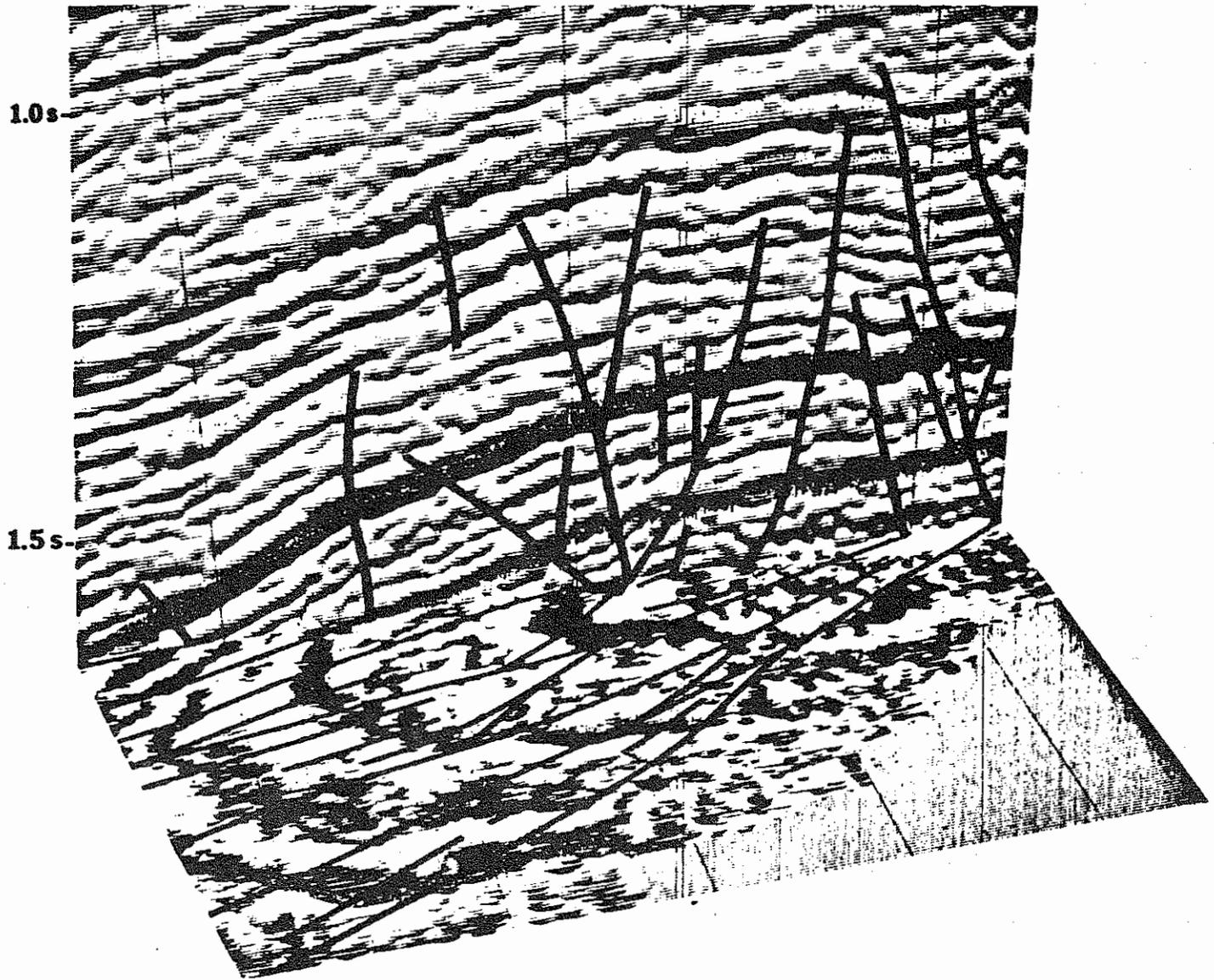
Es una herramienta extremadamente rica en posibilidades, cuya puesta en obra y procesamiento de datos representan una inversión importante. No obstante, su empleo puede ser considerado para estudios de detalle en la evaluación de un yacimiento geotérmico para propósitos de producción. Un ejemplo de tipo de información aportado por el método 3D se muestra en la figura 16, en la cual se puede apreciar una sección vertical y una horizontal a través de un yacimiento de hidrocarburos. Las figuras 17 y 18 son secciones que muestran migración del yacimiento.

4.6 Estudio de los microsismos y del ruido sísmico

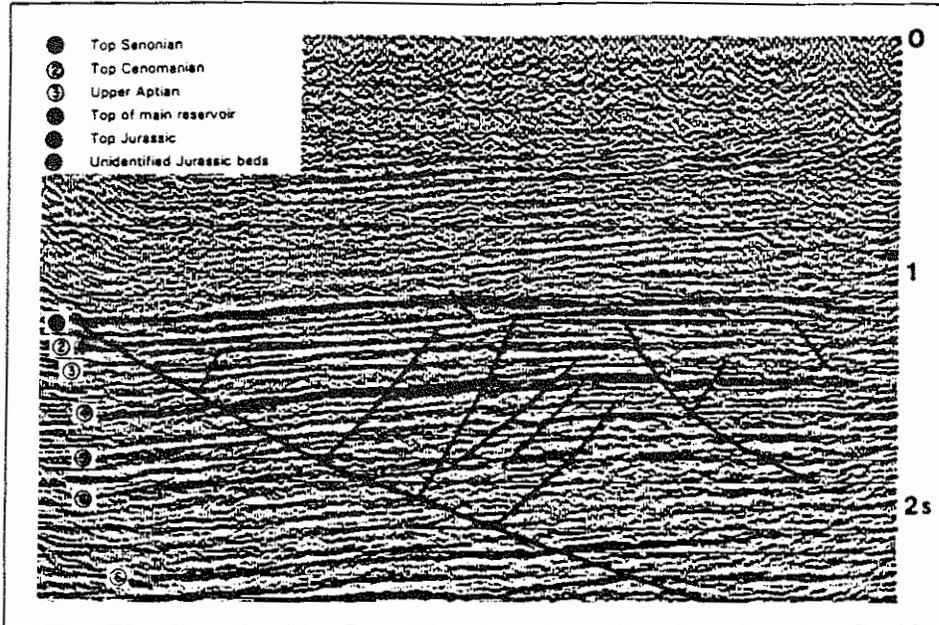
En la mayor parte de los campos geotérmicos se observa una actividad microsísmica y un nivel de ruido sísmico anormalmente elevados, de ahí que surgió la idea de registrar estos parámetros para localizar las zonas de interés. Se trata de un método de reconocimiento, totalmente pasivo y de bajo precio.

A partir del registro de los microsismos, se determina la amplitud, el epicentro y la profundidad de los focos sísmicos. Las zonas que presentan una gran densidad de microsismos, están consideradas como potencialmente más favorables que las zonas tranquilas. Además, la distribución de los focos, aporta informaciones complementarias sobre la posición y el buzamiento de las fallas activas, que sirven de canales para la circulación del vapor o del agua caliente. Según Ward y Bjornson (1971), la actividad sísmica resulta del debilitamiento y de la alteración química de las rocas a lo largo de las fallas y zonas de fracturación por fluidos geotermiales.

Para los registros de ruido, se estudiará, con la ayuda de estaciones móviles, la distribución espacial del ruido sísmico,



Combined horizontal and vertical 3-D migrated section



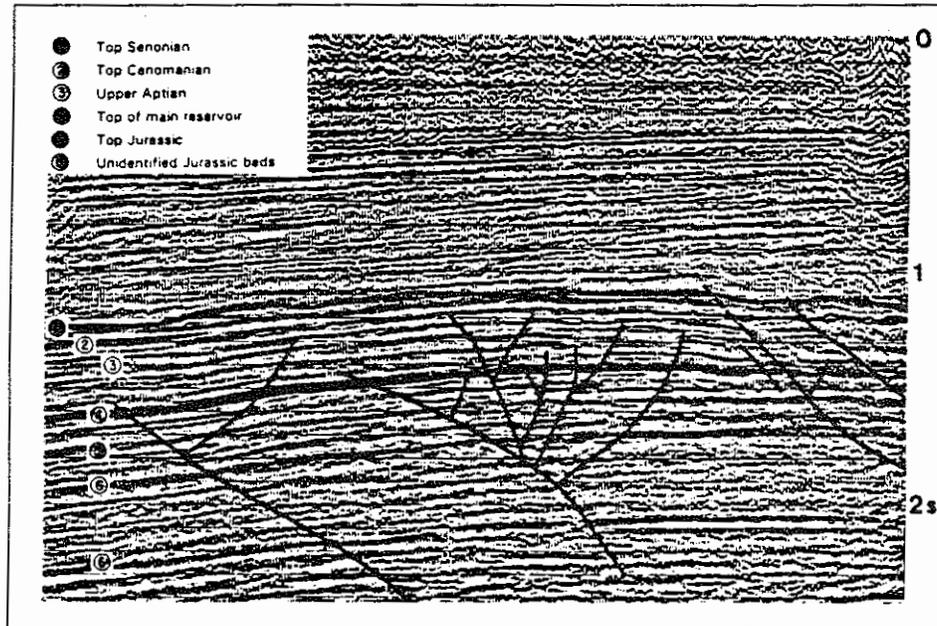
3-D migrated section

así como su energía liberada. Un nivel de ruido elevado es a menudo observado en los campos geotérmicos. Decece en función de la distancia del punto de origen a la superficie. El análisis espectral de este ruido muestra que la superficie activa produce un ruido de frecuencia superior a 10 Hz. Las frecuencias comprendidas entre 0,5 Hz y 10 Hz se deben probablemente a movimientos originados a gran profundidad.

Un ejemplo de aplicación de estos métodos es proporcionado por el estudio del campo geotérmico de los Geysers (California) (Ver Fig. 19). Este campo está situado al interior de la formación "Franciscana" de edad jurásica a cretácica y está en contacto tectónico al Oeste con ofiolitas de edad jurásica.

La formación Franciscana está dividida en 3 unidades: de abajo hacia arriba:

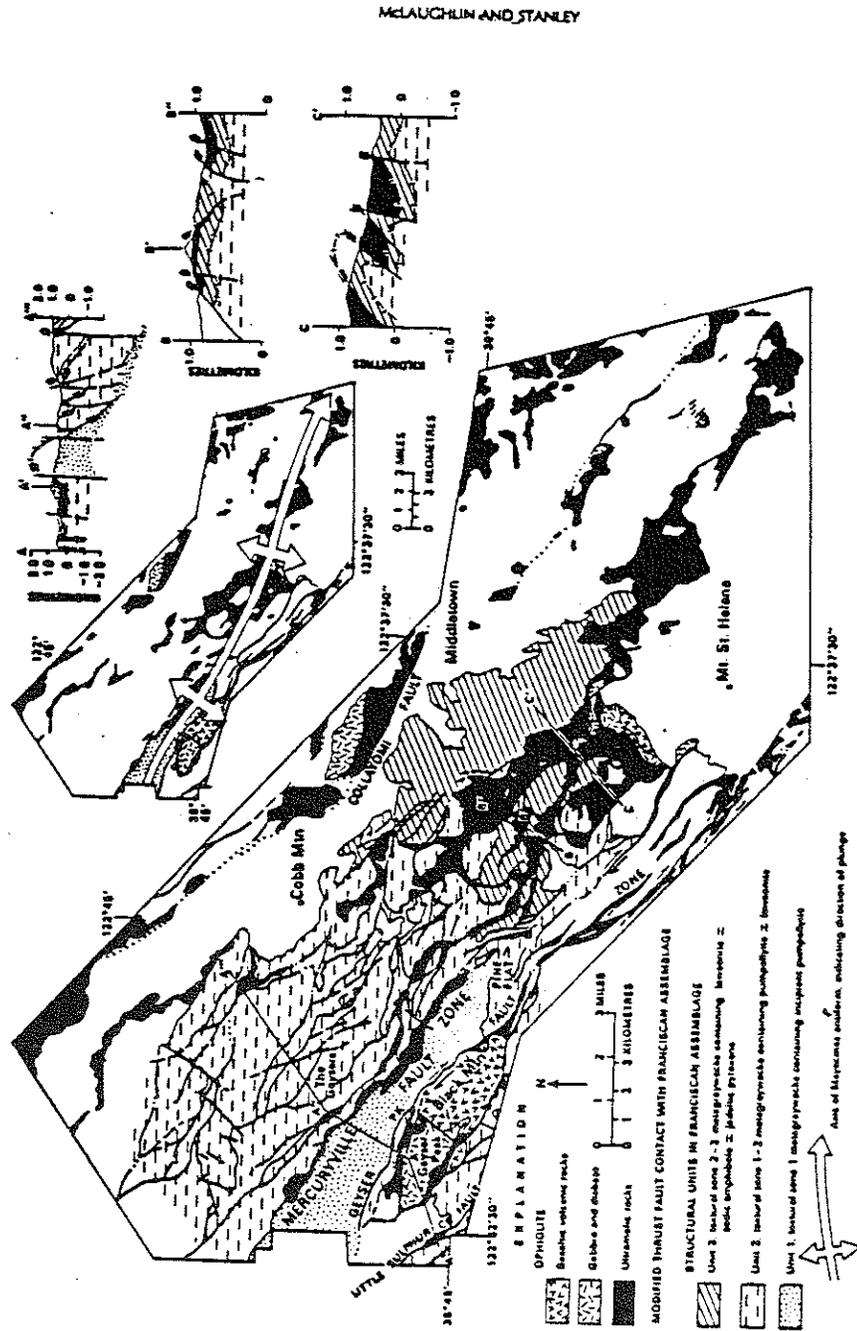
Fig. 18



3-D migrated section parallel to figure 17

- la unidad 1, es una serie de grauwackas de tipo "flysch" con algunas intercalaciones menores de esquistos negros con concreciones. El conjunto forma una serie de pliegues muy cerrados orientados SE - NW,
- la unidad 2, está fuertemente tectonizada, muy heterogénea desde un punto de vista litológico y toma localmente un aspecto caótico. Se presenta como un conjunto de placas largas de varios Km, poderosamente tectonizadas e imbricadas. Estas placas están compuestas de capas de grauwackas, con intercalaciones de esquistos, conglomerados, basaltos y calcedonias. Están separadas por zonas de fricción que comprenden las mismas rocas anteriormente mencionadas, más masas aisladas de esquistos azules de eclogita y serpentina,
- la unidad 3, tiene sensiblemente la misma composición que la unidad 2, sólo que notablemente menos tectonizada.

Fig. 19



Map showing major structural units of the Franciscan assemblage in the Geysers steam field and vicinity, with respect to distribution of ophiolite and faults.

El campo geotérmico se encuentra en el seno de unidad 2, que es entre todas la más permeable, considerando su fuerte fracturación. En la zona del campo, la alteración hidrotermal es importante.

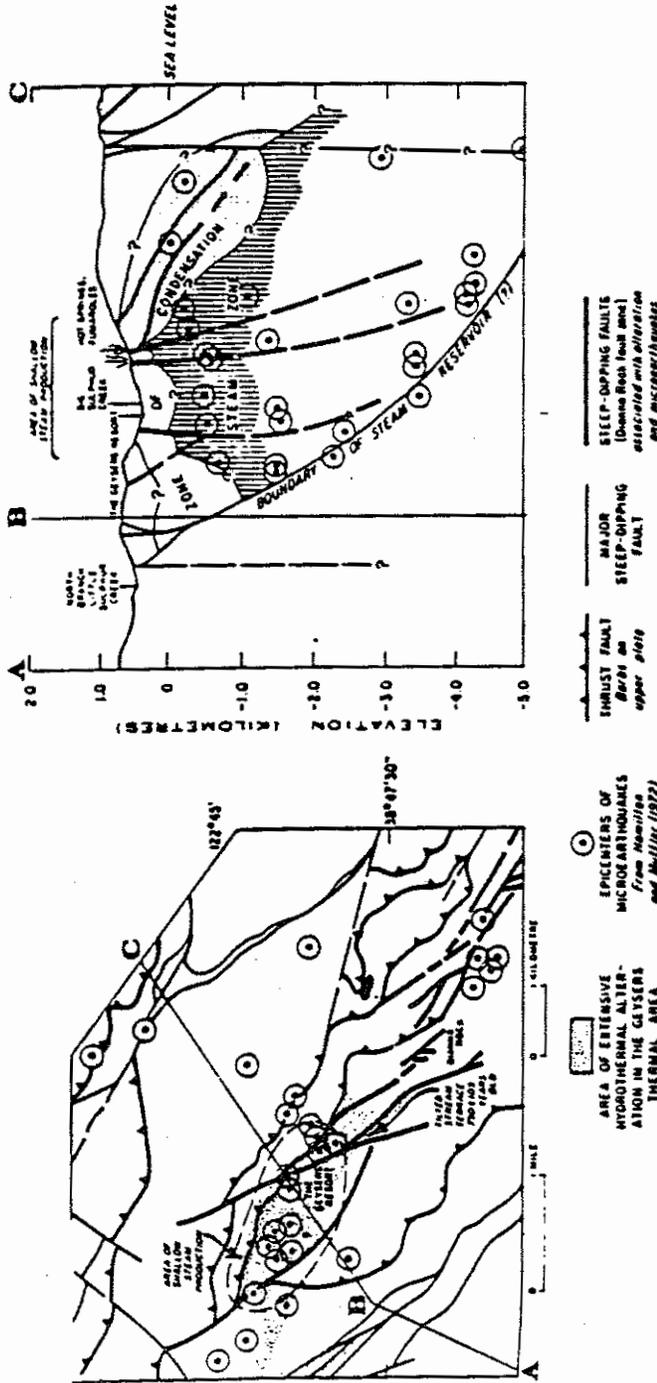
La figura 20 muestra en planta la distribución de los microsismos de la zona. Nótese su concentración en la zona de los Geysers y su casi ausencia fuera de esta zona, excepto en el sureste de Diana Rock. En la Figura 21, se han proyectado microsismos próximos al corte ABC. Ha sido posible por este medio precisar la extensión en profundidad de las fallas mapeadas en la superficie del terreno. Nótese la gran falla que parece limitar el yacimiento al Oeste.

4.7 La polarización espontánea (S.P.)

En el caso de campos geotérmicos de tipo auto-sello (self sealing), se observa a veces la existencia de una anomalía positiva asociada al campo. La amplitud de esta anomalía generalmente no sobrepasa los 100 milivoltios.

Se han dado diferentes explicaciones: circulación de soluciones conductoras ricas en sales y fijaciones preferenciales de aniones por las rocas, que conducen a la formación de una anomalía positiva por encima de la zona de circulación ascendente de las aguas. Otra explicación hace intervenir el acoplamiento termoelectrónico. Esta explicación supone la presencia de una fuente caliente y una interfase con cambios en resistividad en cada lado.

Considerando su bajo costo de operación, este método no debe ser rechazado a priori, en la medida en que pudiera aportar informaciones sobre la circulación de los fluidos a poca profundidad. No obstante, su empleo parece ser relativamente limitado.



Map showing relation of hydrothermal alteration and microearthquakes to the Dianna Rock fault zone near Geysers Resort. Left: map view. Right: vertical cross section showing distribution of microearthquake hypocenters and inferred relation to steam reservoir.

Mc Langhlin and Stanley 1975

4.8 Los métodos eléctricos

En esta rúbrica se pueden incluir todos los métodos cuyo propósito es el de medir la resistividad de los diferentes niveles:

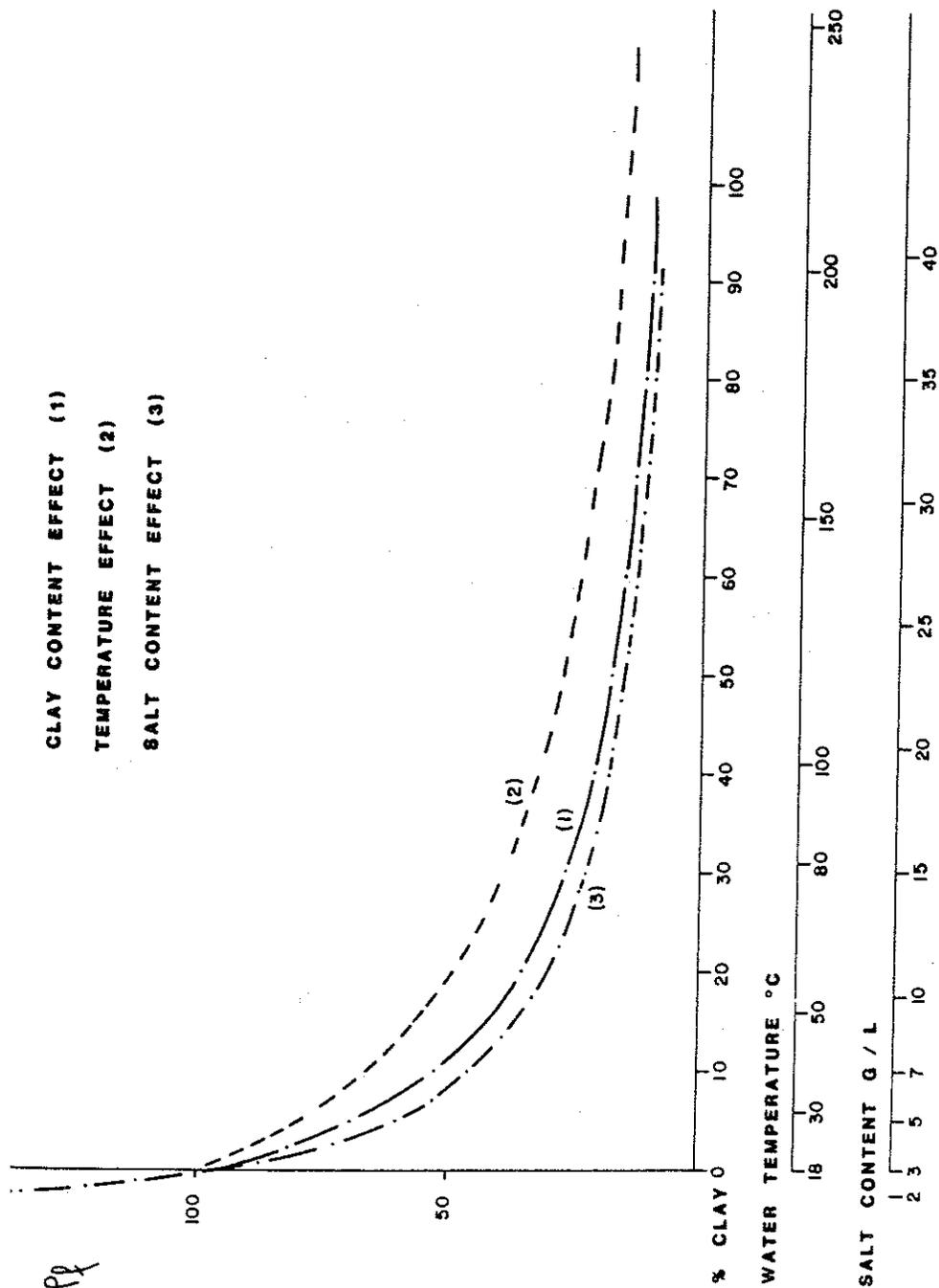
- la corriente continua (D. C.),
- una fuente artificial variable (electromagnetismo),
- una fuente natural (magnetoteléfica).

Estos métodos a menudo son utilizados en prospección geotérmica, ya sea por estudios estructurales o por la búsqueda de anomalías conductoras. Al respecto, se sabe que la resistividad de un electrolito disminuye cuando la temperatura aumenta. Por lo tanto parecía factible buscar anomalías conductoras que deberían representar zonas calientes. Esta relación, que se ha efectuado a menudo, parece un poco incompleta, pues la temperatura no es el único factor que puede contribuir a un cambio de resistividad de una formación. Estos factores son los siguientes:

- variación de la cantidad de arcilla en la formación,
- variación de la porosidad total de la formación,
- variación de la cantidad de sales disueltas en el agua contenida en la formación,
- variación de la temperatura del agua contenida en la formación.

1) Cantidad de arcilla (Fig. 22 - curva 1)

Se ha tomado como ejemplo un reservorio cuya resistividad es de 100 ohm. m., en la cual se introduce un porcentaje creciente de arcilla a 10 ohm.m. Se nota entonces que la influencia de la arcilla es muy importante y que por una cantidad apenas superior a un 10%, la resistividad de la



formación está aquí dividida por dos.

2) Temperatura del agua (Fig. 22 - curva 2)

Se sabe que la resistividad de una formación acuífera es directamente proporcional al agua contenida en ella.

$$\rho_f = \rho_w \phi^{-m} \quad (\text{Archie})$$

ρ_f = resistividad de la formación

ρ_w = resistividad del agua

ϕ = porosidad total de la formación

m = coeficiente de cementación (comprendido entre 1,3 para terrenos sueltos a 2,2 por terrenos compactos)

$$\frac{\rho_f}{\rho_w} = \text{coeficiente de formación } F$$

Sobre la curva 2 se han reportado las variaciones de ρ_f para una formación saturada con agua, cuyo contenido en sal es de 3 g/l

(ρ_w a 18°C = 2 ohm.m), y por el cual el coeficiente $F = 50$ (ρ_f a 18°C = 100 ohm.m). La única variable es la temperatura del agua, donde la conductividad se puede calcular por la relación:

$$\sigma = (1.17013 + 0.03299 T^{1.05257}) S^{0.90347}$$

σ = conductibilidad en milimhos. cm ($\rho_{\text{ohm.m}} = \frac{10}{\sigma}$)

T = temperatura del agua en °C

S = cantidad de sales disueltas en g/l

La curva (2) hace sobresalir el efecto de la temperatura del agua sobre la resistividad ρ_f , que pasa de 100 Ohm.m a 18°C a 15 Ohm.m para el agua a 250°C (mantenida al estado líquido gracias a las condiciones de presión).

Las variaciones indicadas hasta aquí, se refieren a un acuífero en el cual, el fenómeno de convección es activo. Otro efecto de la temperatura netamente inferior al precedente, puede ser considerado. Se refiere a la cobertura del reservorio caliente, el cual, por conducción, puede recalentar la parte inferior del recubrimiento impermeable. Supongamos un yacimiento a la temperatura T, cubierto por margas impermeables homogéneas. La temperatura $\frac{T}{2}$ puede ser obtenida en las margas a 27 m encima del reservorio al cabo de 100 años y a 270 m al cabo de 10,000 años (Migaux, 1952). Este aumento de temperatura de las margas contribuye a disminuir su resistividad (ésta, en líneas generales, está dividida por 5 cuando la temperatura pasa de 20 a 150°C). Tal fenómeno ha podido ser constatado en casos en que el recubrimiento es litológicamente muy homogéneo. Se ha observado igualmente que el efecto de la temperatura sobre la resistividad del recubrimiento, se anulaba o invertía por ligeros cambios de facies de la base de este recubrimiento. Por lo tanto, esta información no puede considerarse como significativa. Cuando más será una información suplementaria en el caso de que el recubrimiento arcilloso o margoso sea muy homogéneo.

3) Salinidad del agua

A una temperatura dada, la resistividad del agua disminuye cuando la concentración de sales disueltas aumenta. Esta variación puede ser calculada a partir de la fórmula indicada en el paréntesis siguiente: ($\sigma = f(T, S)$). La curva 3 de la Fig. 22 muestra la evolución de la resistividad de una formación acuífera cuando la proporción de sales aumenta (valores para $T_w = 18^\circ$ y $F = 50$).

4) Porosidad

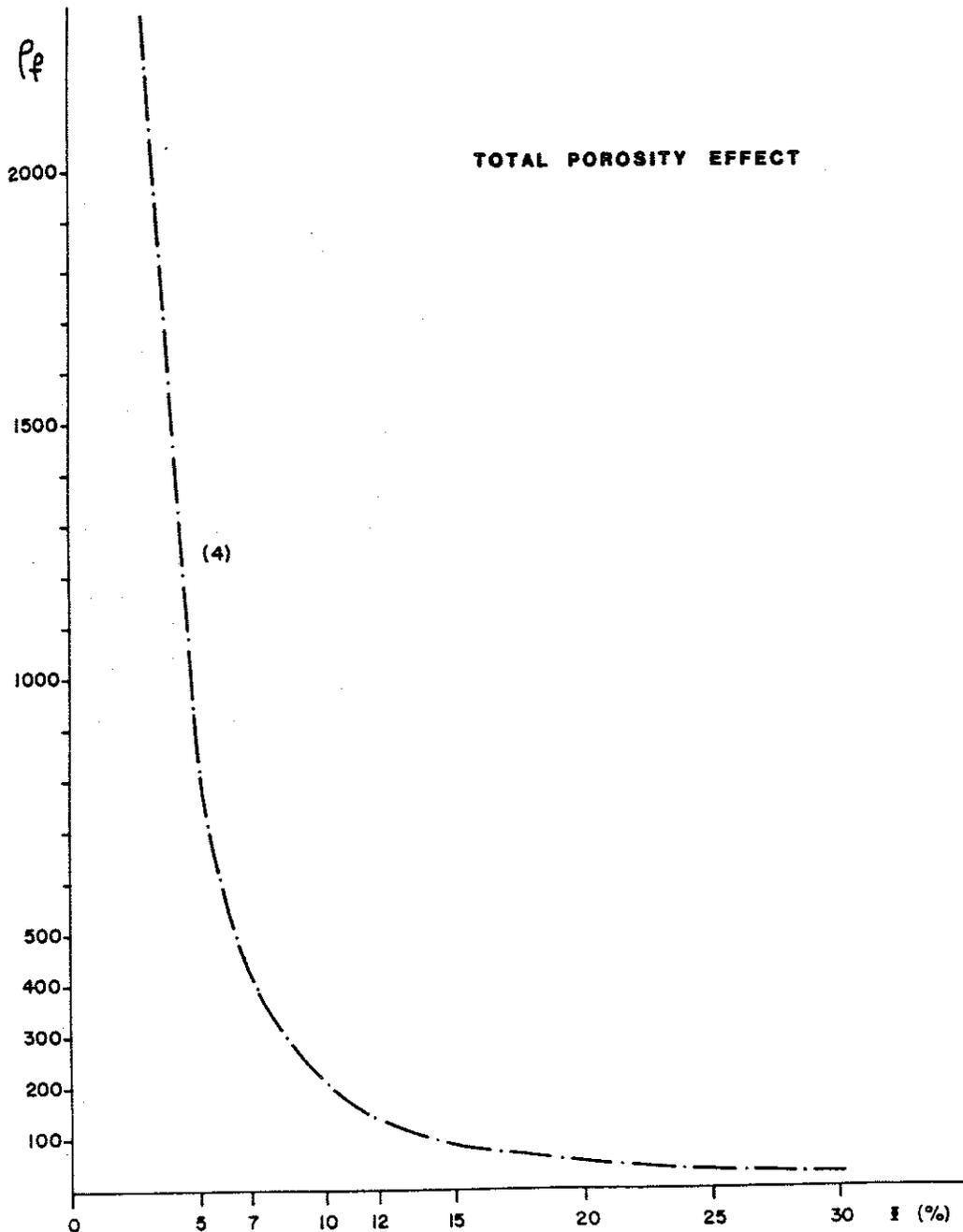
La curva 4 de la Fig. 23, muestra el efecto de las variaciones de la porosidad total, sobre la resistividad ρ_f de la formación (para $\rho_w = 2$ ohm.m y $T_w = 18^\circ$ C). El efecto de los cambios de porosidad sobre ρ_f es muy importante. En este caso determinado puede apreciarse que si la porosidad total pasa de 5 a 15%, ρ_f es dividida por 10.

Se puede apreciar por lo tanto, que las variaciones de uno o varios de los parámetros examinados, tendrán una repercusión sensible sobre la resistividad de una formación acuífera. Aún en una prospección geotérmica se corre el riesgo de ser inadecuado el querer explicar la disminución de la resistividad de una formación, por el solo efecto de la temperatura. A veces este efecto puede ser compensado o modificado por la variación de los otros parámetros como por ejemplo:

Temperatura del agua	50°C	200°C	200°C
Salinidad del agua	3 g/l	2 g/l	10 g/l
Porosidad total (m = 2)	10%	7 %	10 %
ρ_f (en ohm. m)	116	110	12.6

De estos datos podemos deducir que una zona conductora, no es siempre el signo de la presencia de un reservorio geotérmico, y que un programa geofísico orientado únicamente hacia la búsqueda de anomalías conductoras, podría perfectamente traducirse en un fracaso. Por lo general, es muy importante poner en uso métodos que permiten hacer una interpretación cuantitativa, que conduzca al establecimiento de un corte eléctrico completo, a partir de la superficie del suelo hasta el objetivo profundo, con el objeto de poner en evidencia, en forma adecuada

FIG. 23



da, el origen de ciertas anomalías. Si por ejemplo, se examina un mapa de conductancia total o un mapa de resistividad aparente (documentos proporcionados generalmente en los estudios geotérmicos), es importante saber de donde puede provenir una anomalía de conductancia o de resistividad aparente. Esta puede producirse debido:

- al aumento de espesor del recubrimiento conductor,
- a una variación de resistividad de este recubrimiento,
- a la aparición de una capa conductiva, por ejemplo cerca de la superficie, etc.

La figura 24 muestra, que la presencia de un reservorio de agua caliente, puede traducirse por una anomalía resistiva que indica la posición estructural alta de dicho yacimiento, el cual en este punto es más resistivo que su recubrimiento.

Solamente la interpretación cuantitativa ayudará a encontrar una explicación acerca del origen de estas anomalías. Por otra parte, los elementos proporcionados por las otras disciplinas y que intervienen en esta búsqueda (geología, geoquímica), a menudo permiten seleccionar la interpretación más plausible.

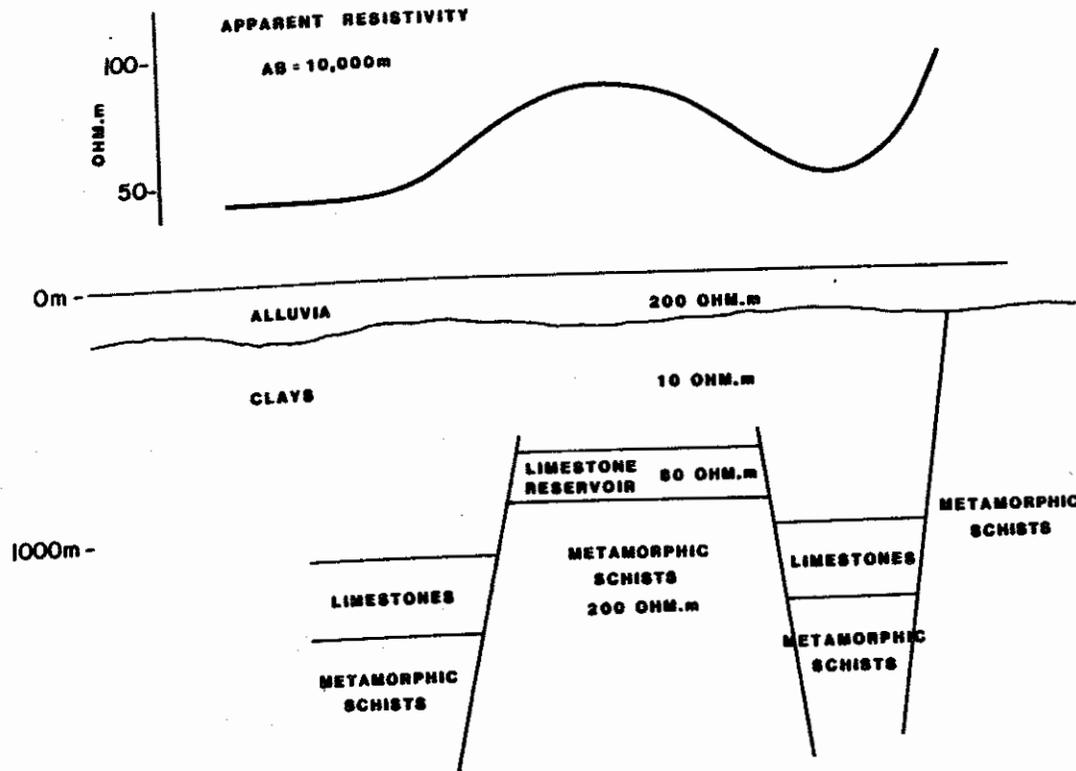
Según el tipo de fuente de energía, los métodos eléctricos pueden ser clasificados en tres grupos:

- los métodos que utilizan corriente continua,
- los métodos electromagnéticos que utilizan una fuente variable artificial,
- los métodos que utilizan los campos naturales.

4.8.1 Métodos que utilizan la corriente continua (DC)

Estos métodos pertenecen a los utilizados más antigua-

FIG. 24



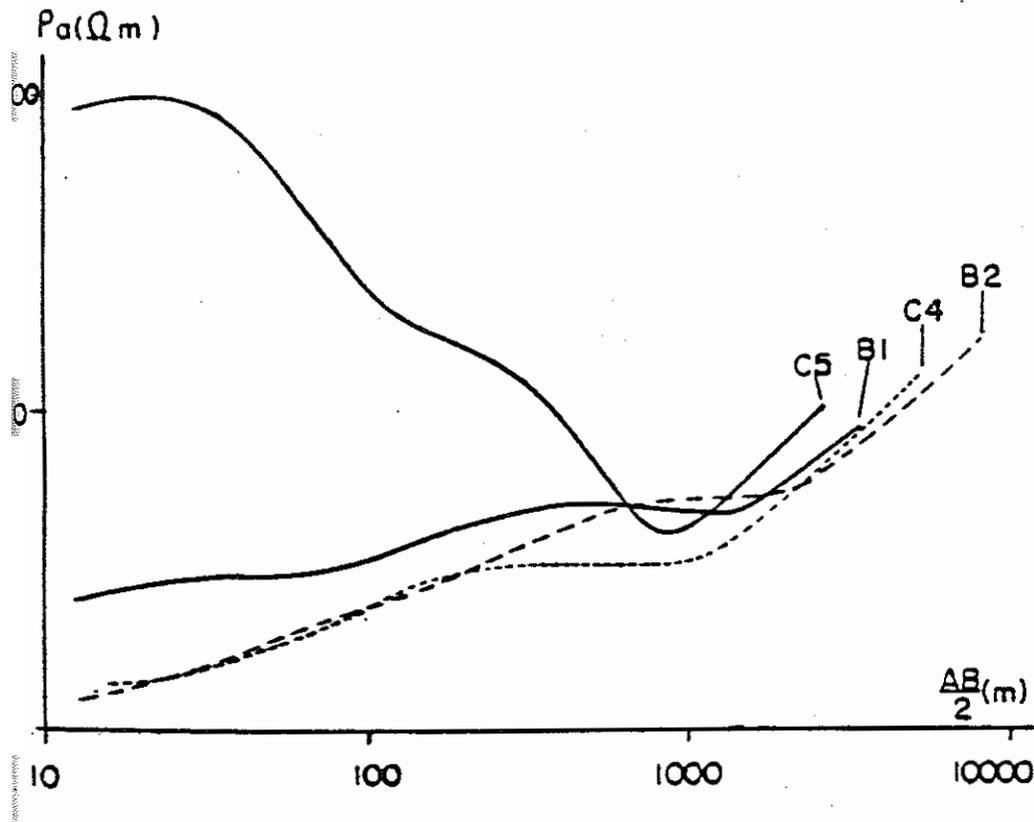
mente. La medida de la caída de potencial entre dos electrodos y de la intensidad de una corriente enviada entre dos polos, permite calcular la resistividad aparente del subsuelo, por un cierto dispositivo de medidas. La profundidad de investigación está ligada a las dimensiones del dispositivo.

Para la investigación vertical del subsuelo, se utiliza uno de los dos dispositivos siguientes: cuadrípulo Schlumberger o dipolo-dipolo. Los resultados son ploteados en una curva de la resistividad aparente en función de la separación media de los electrodos de corriente, o como pseudo-secciones. Las curvas obtenidas (Fig. 25) son analizadas por computadora que proporciona una solución de multi-capas; por cada capa se obtiene un valor de la conductancia longitudinal (h/p), parámetro representativo de las capas conductoras y de la resistencia transversal ($h.p$), la cual caracteriza las capas resistentes. Si se hacen hipótesis razonables acerca de la resistividad de las diferentes capas, se podrá obtener una estimación de los espesores y establecer un esquema estructural.

El valor de las resistividades se puede obtener después de haber realizado pruebas automáticas de equivalencia, que permitirán proporcionar una solución compatible con la curva experimental, y con los datos geológicos que se pueden conocer.

Para la investigación de profundidades inferiores a 700-1000 m, se utiliza generalmente el dispositivo Schlumberger, el cual al reducir el número de desplazamientos de los electrodos, permite atenuar o corregir la influencia de heterogeneidades en las inmediaciones de los electrodos.

Fig. 25



Sin embargo, la profundidad de investigación está en proporción a la separación de los electrodos de corriente, lo cual nos enfrenta inmediatamente con problemas logísticos: tamaño del dispositivo y seguridad de los envíos de corriente.

Para solucionar estos inconvenientes, en el caso de sondeos eléctricos profundos, se realiza a veces la técnica dipolo-dipolo, que permite utilizar dispositivos de envío de corriente mucho más cortos. En cambio las intensidades de corriente necesarias serán muy elevadas, lo cual es aceptable cuando las líneas son cortas y pueden ser sometidas a vigilancia. Las variaciones laterales de resistividad, ejercen una influencia notable sobre este método, lo cual constituye un inconveniente, y generalmente hay tendencia a asociar una cartografía de la resistividad aparente en base a sondeos eléctricos someros, con el objeto de realizar una interpretación correcta de estos últimos.

El estudio de las variaciones laterales de las resistividades será realizado, ya sea por perfiles de resistividad, o por mapas de resistividades trazados con una longitud de línea AB constante.

En el primer caso se utilizará preferentemente el cuadrípulo Schlumberger o el dipolo-dipolo. En el segundo caso, se utilizará el dispositivo rectángulo Schlumberger (rectángulo de resistividad o método TUBEL, que consiste en utilizar como toma de envío de corriente, la tubería metálica de 2 perforaciones distantes entre ellas varios kilómetros).

4.8.2 Métodos que utilizan una fuente artificial variable

Durante estos últimos años se ha hecho un esfuerzo considerable, para utilizar los métodos electromagnéticos en prospección geotérmica. Sin embargo, las profundidades de investigación son generalmente mayores que en prospección minera, por lo que se ha debido recurrir a frecuencias más bajas, teniendo que utilizar por lo tanto un equipo más pesado.

En estos métodos se crea un campo eléctrico primario, enviando una corriente con frecuencias variables en un circuito cerrado o por intermedio de un dipolo. Se miden las componentes de los campos eléctrico y magnético originados por las corrientes inducidas.

Los sondeos electromagnéticos permiten una investigación en profundidad, haciendo variar la distancia emisor-receptor y/o la frecuencia de la corriente emisora. Se puede definir una profundidad de investigación p :

$$p = 0,5 \sqrt{\rho / f} \text{ km}$$

f es la frecuencia de la señal
 ρ es la resistividad del medio en ohm.m

Según esta fórmula, se puede deducir que cuanto más resistente es el medio, mejor es la penetración. Una ventaja de este método sobre el de corriente directa, es que en el caso de altas resistividades superficiales, el efecto de pantalla es muy débil o inexistente, lo cual no ocurre en el caso de corriente continua. Esto se debe al hecho de que en E.M. lo que interesa es una magnitud suplementaria, que es la frecuencia de corriente emitida. A la observación de un campo eléctrico con frecuencia nula, se sustituye una serie de parámetros de campos eléctricos o magnéticos, por un cierto número

de frecuencias. Un terreno que actúa como pantalla en corriente continua, se deja atravesar por ciertas componentes E.M.. Un terreno muy resistente actúa como pantalla para un campo eléctrico, lo cual no ocurre para un campo magnético.

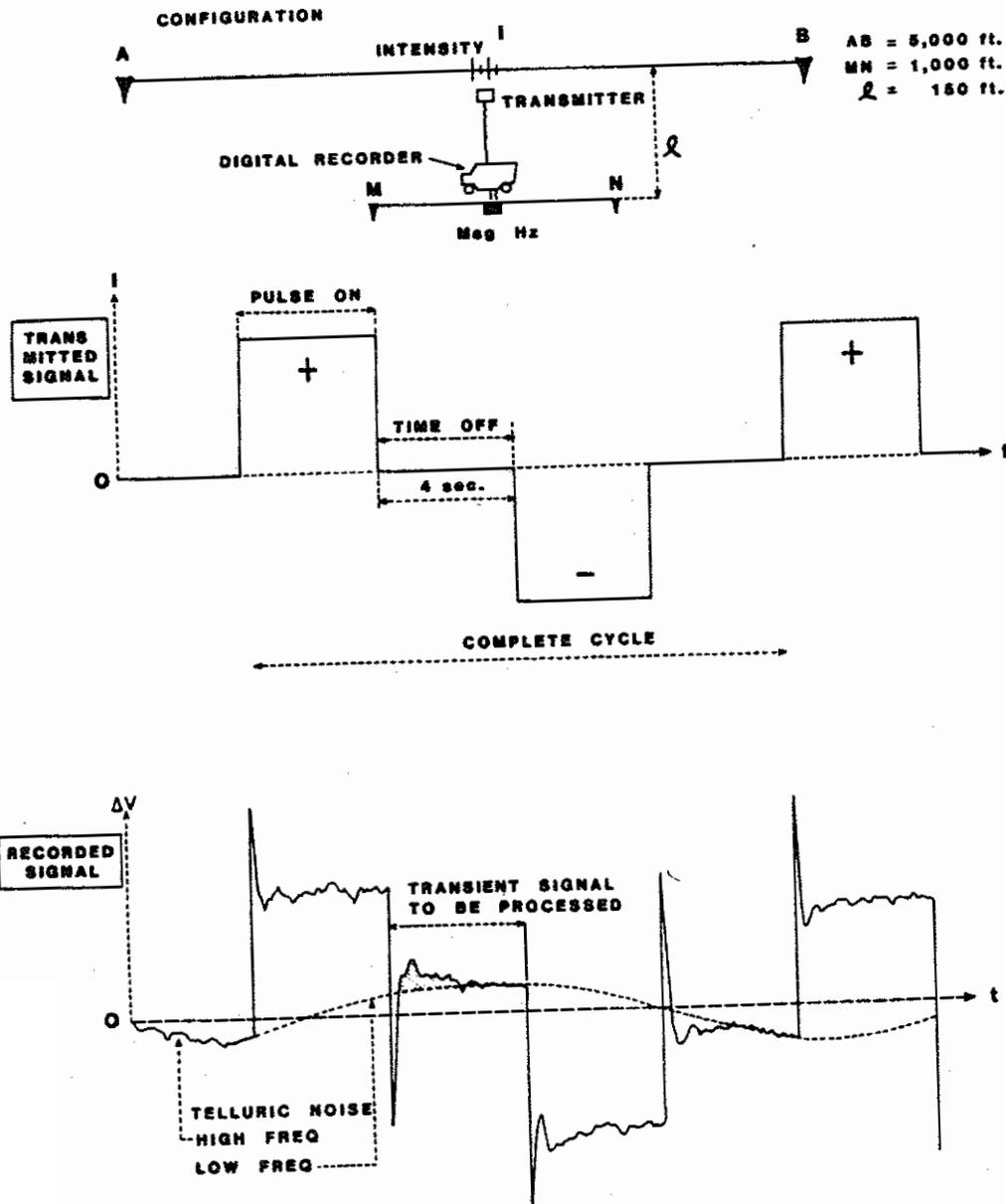
Señalemos igualmente los métodos E.M. trabajando en el dominio del tiempo. Ellos conducen a observar fenómenos transitorios que permiten revelar efectos secundarios muy débiles. Esto es posible porque la medida del efecto secundario, se hace en el instante en que el efecto primario, mucho más intenso, se termina (emisión impulsional de corriente).

La precisión necesaria para la medición es entonces fácilmente lograda. En el dominio de frecuencia habría que haber medido pequeñas variaciones de amplitud y de fase de sinusoides, lo cual representa una operación muy delicada. El método transitorio hace intervenir el fenómeno de polarización y de resistividad compleja. En efecto, las perturbaciones de los campos E.M. inductores, son netamente superiores a los que se habrían podido obtener con una resistividad real, es decir, en el caso en que ninguna formación fuera polarizable.

Es prematuro decir si las condiciones locales provocan el fenómeno de resistividad compleja, ya que aún no se tiene suficiente experiencia en las áreas geotérmicas. Se hizo un ensayo en un campo geotérmico (acción concertada CEE-CGG) con el método TRANSIEL (patente CGG). Su uso está indicado en la figura 26. La señal transitoria se observa durante el tiempo de reposo. La medición se repite varias centenas de veces. La emisión se efectúa con un dipolo eléctrico (1 a 3 Km) y la recepción en un dipolo más corto (200 a 500 metros), paralelo al emisor y en un dipolo magnético vertical u horizontal. Teniendo en cuenta la magnitud de las señales útiles para medir (de algunos microvolts/ampere a algunas centenas de microvolts/ampere), se ha recurrido a un grabador numérico.

TRANSIEL FIELD OPERATIONS

FIG. 28



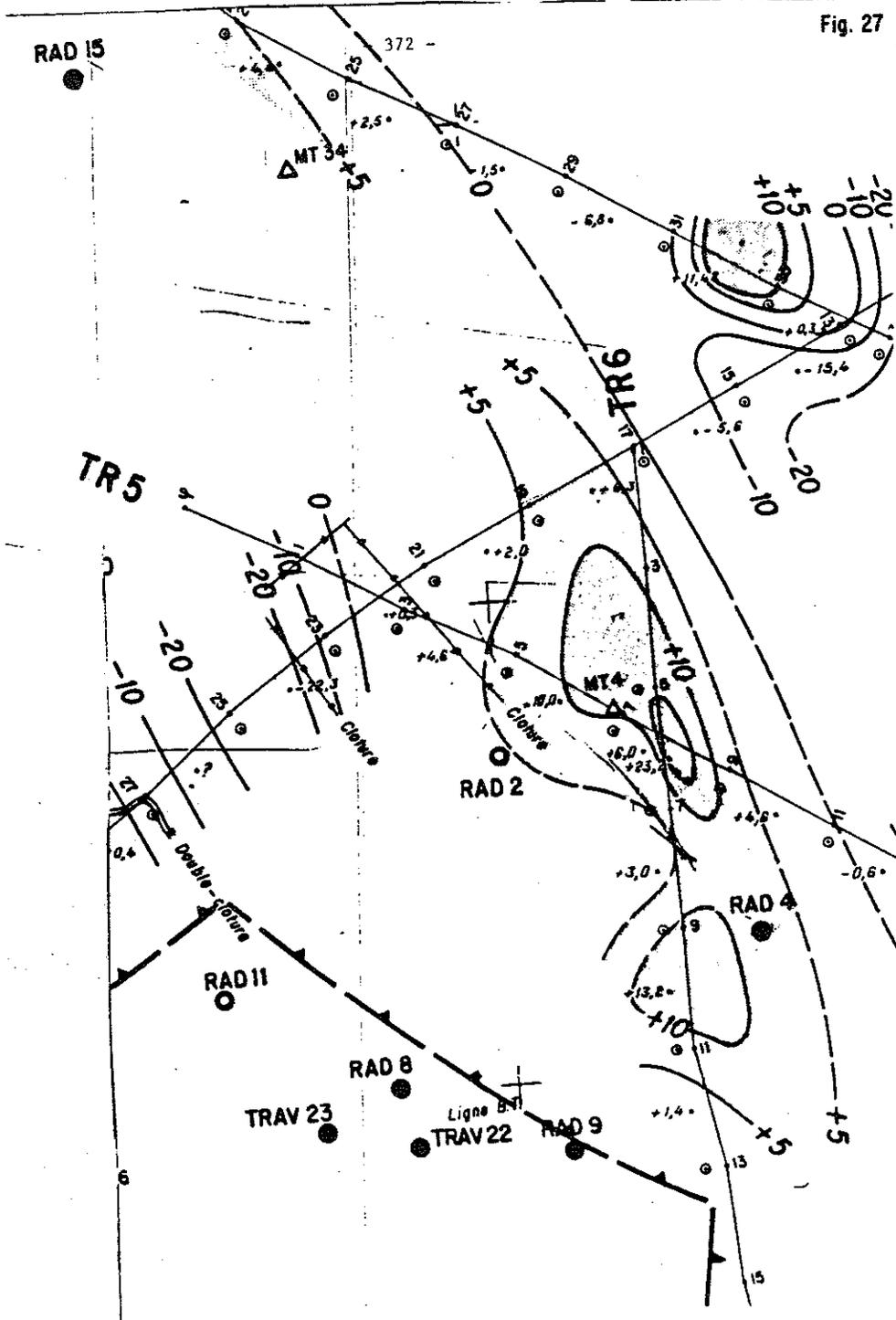
Varios parámetros son estudiados: amplitud total, área total definida por la curva, amplitud residual, constantes de tiempo. En la figura 27 se muestran los valores de la amplitud residual.

Este mapa hace resaltar una anomalía positiva, en el interior de la cual se sitúa la perforación RAD4 productiva, (RAD2 está sin producción). Por lo tanto, se ha comprobado la presencia de fenómenos de polarización sobre la vertical de un campo geotérmico, representado aquí por un reservorio en rocas calizas, con un recubrimiento arcillo-margoso. El conjunto de este reservorio está a una temperatura elevada y la producción depende de su permeabilidad (fisuración y fracturación), la cual parece variar rápidamente de una perforación a la otra. Es posible imaginar que en los sectores donde ésta formación es prácticamente impermeable, los intercambios con el recubrimiento son muy limitados (aparte del efecto térmico por conducción). Por el contrario, se puede considerar que por encima de las zonas permeables del reservorio, los cambios termoquímicos con el recubrimiento son más activos, con posibilidad de escapes en el recubrimiento y creación de cuerpos polarizables (por ejemplo, sulfuros diseminados). La anomalía transitoria sería entonces provocada por estos cuerpos polarizables, que representan un efecto secundario y traducen la presencia de formaciones permeables conteniendo un fluido caliente. Caeciendo de experimentaciones más avanzadas, no se puede aún llegar a ninguna conclusión acerca de la validez del método para prospección geotérmica.

4.8.3 Métodos que utilizan una fuente natural

Se trata esencialmente del método magnetoteléurico que utiliza una fuente de emisión natural. Las variaciones del campo magnético terrestre producen un campo eléctrico: su resultado es la existencia de corrientes telúricas.

Fig. 27



cas, que son inducidas por las variaciones de la componente horizontal del campo magnético perpendicular a su dirección. Las medidas del campo eléctrico y de las componentes horizontales del campo magnético, en frecuencias dadas, permite calcular la resistividad aparente para cada una de estas frecuencias ($\rho_a = 0.2 T \frac{E}{H^2}$; T = período).

Prácticamente, en el campo se registran las variaciones de las 5 componentes E_x , E_y y H_x , H_y , H_z . Las sondas son electrodos impolarizables para las medidas eléctricas y magnetómetros de inducción para las medidas magnéticas. El espectro de las señales recibidas va de 125 Hz a 0.003 Hz, descomponiéndose en tres bandas de frecuencias:

- altas frecuencias = 125 a 2 Hz
- medianas frecuencias = 12,5 a 0,2 Hz
- bajas frecuencias = 1,25 a 0,003 Hz

Como resultado, la profundidad de investigación de este método puede ser muy importante (varias decenas de Km). La fig. 28 reproduce dos sondeos MT, efectuados durante una prospección geotérmica, que hacen aparecer a gran profundidad (7,5 y 12 Km) una capa conductiva que, según los geólogos, podría tener relación con la fuente de calor profunda (cámara magnética).

También podemos señalar:

- el método audio-magnetotelúrico que utiliza frecuencias yendo desde algunos Hz a varios millares de Hz (8 Hz a 20KHz por ejemplo). Su profundidad de investigación es notoriamente más débil, pero puede ser aplicado, ya sea como complemento del precedente,

para tener informaciones más próximas a la superficie, o para estudios donde el objetivo se encuentra a pequeña profundidad,

el método telúrico, basado sobre el hecho de que el campo telúrico puede ser asimilado a uno de un dipolo de longitud infinita. Si la corteza terrestre fuera homogénea, sería uniforme. Las variaciones del campo telúrico en la escala regional están, por lo tanto, ligadas a las heterogeneidades del subsuelo.

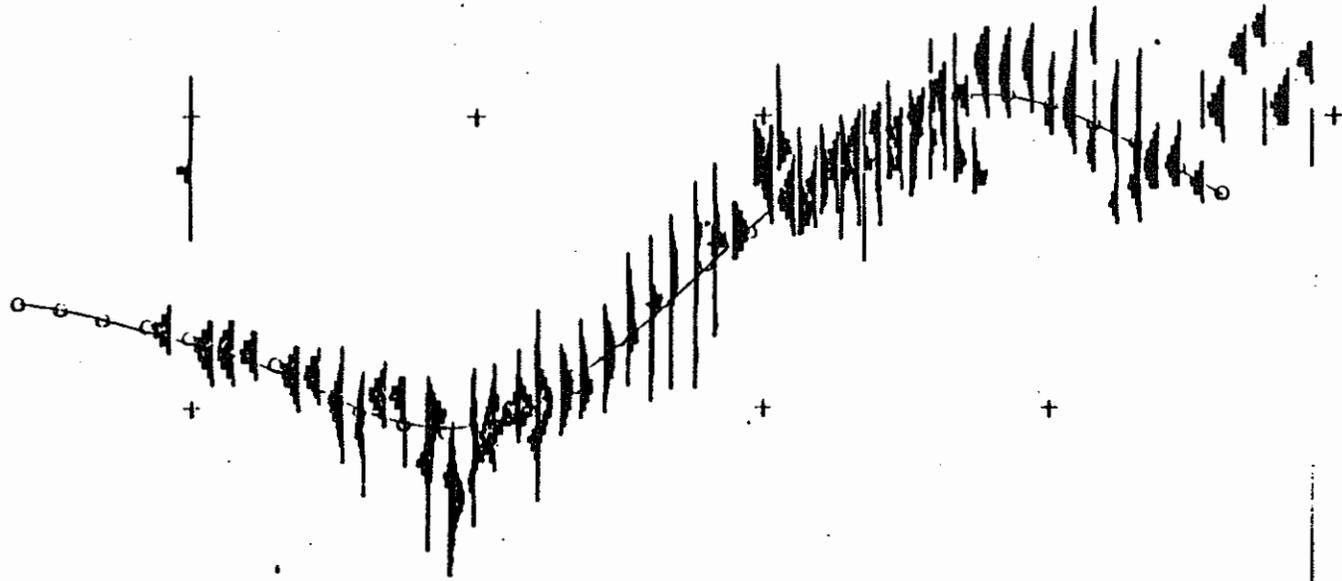
Los métodos telúrico y magnetotelúrico se pueden combinar (TMT). Se graba el campo magnético en una estación y el campo eléctrico en varias estaciones, repartidas a una cierta distancia (varias centenas de metros) de la estación central. Esta manera de proceder se justifica por el hecho, de que el campo eléctrico está enormemente afectado por la litología y la resistividad de las formaciones, mientras que el campo magnético es menos sensible. Por lo tanto, se utiliza por cada estación, la grabación de los datos magnéticos de la estación central. Este procedimiento permite aumentar considerablemente la producción de un equipo sobre el terreno.

Por último mencionemos un procedimiento del método magnetotelúrico, utilizando una referencia lejana (RRP, "remote reference point"). Se graban simultáneamente dos estaciones completas, con varios kilómetros de distancia entre ellas (5 a 50 KM o más). Esto requiere el uso de 2 unidades de registro y una sincronización perfecta entre las dos grabaciones. El objeto de tal trabajo es el de obtener mediciones menos perturbadas, en las cuales los ruidos naturales o artificiales se

habrán podido eliminar en parte o en su totalidad. Para esto es necesario que las estaciones no sean perturbadas por los mismos ruidos.

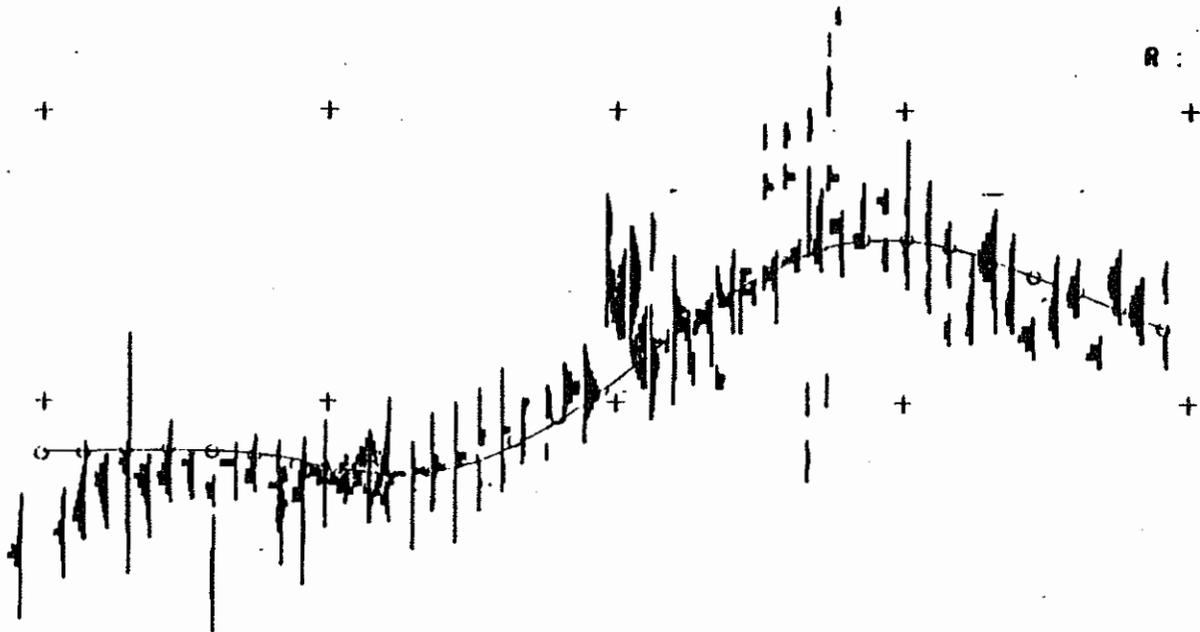
Computer interpretation

$h_1 = 110 \text{ m}$ $\rho_1 = 22 \text{ ohm.m}$
 $h_2 = 312 \text{ m}$ $\rho_2 = 7 \text{ "}$
R : $h = 11740 \text{ m}$ $\rho_3 = 1200 \text{ "}$
 ∞ $\rho_3 = 10 \text{ "}$



Computer interpretation

$h_1 = 659 \text{ m}$ $\rho_1 = 6.7 \text{ ohm.m}$
R : $h_2 = 6897 \text{ m}$ $\rho_2 = 178 \text{ "}$
 ∞ $\rho_3 = 7.1 \text{ "}$



- 374 -

Fig. 28

ANEXO 1

EJEMPLO DE APLICACION DE LA GEOFISICA

La zona a la cual se hace referencia es la de Denizli Sarakoy en Anatolia Occidental (Turquía) al interior de la cual se encuentra el campo de Kizildere (ver fig. 1).

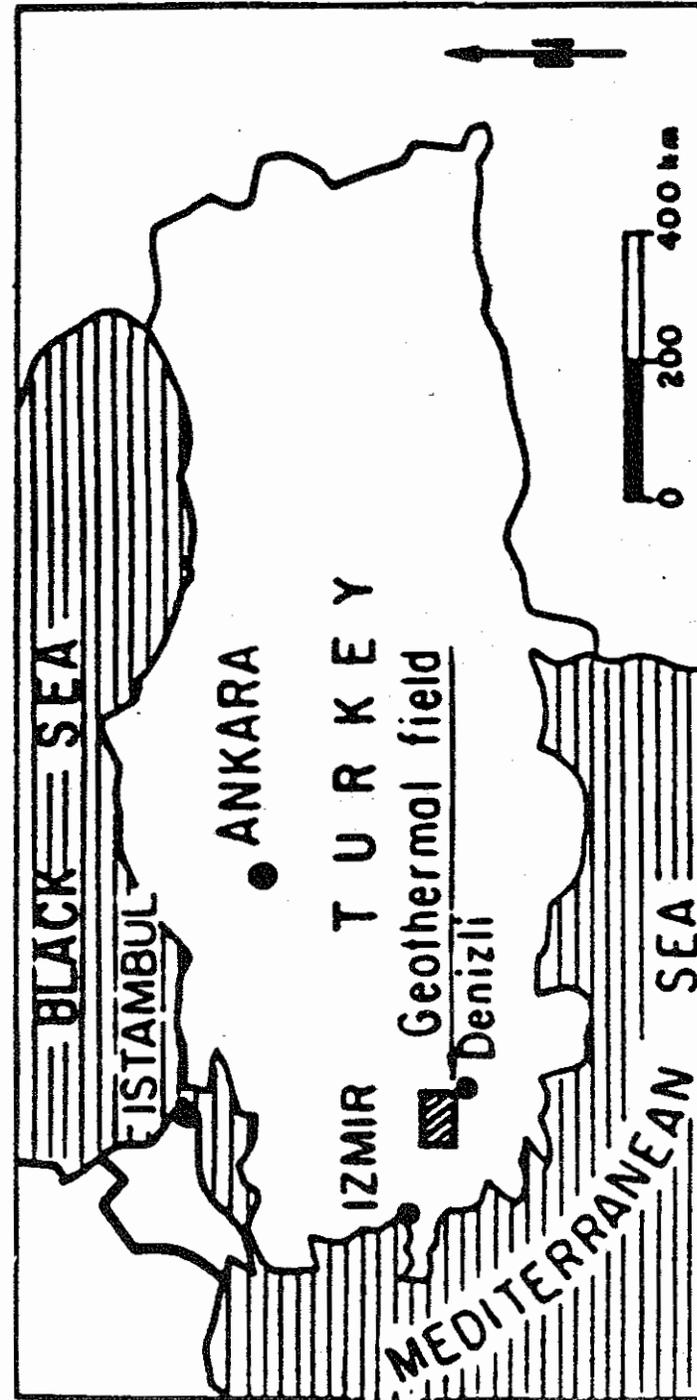
Es un campo geotérmico de tipo sedimentario que presenta la sucesión siguiente :

- Cuaternario : Travertino - Aluviones
- Plioceno : Areniscas - caliza - arcilla - serie yesosa
- Mioceno superior : Arcilla - marga
- Mioceno medio : Caliza y caliza margosa
- Mioceno inferior : Arcilla
- Paleozoico : Mármol - micaesquistos gnéissicos.

La serie está descrita más detalladamente en la figura 2. Las formaciones que podrían representar un yacimiento geotérmico potencial son las calizas del Mioceno medio y el basamento paleozoico, bajo reserva que cumplan con las condiciones siguientes :

- buena permeabilidad
- realimentación acuífera adecuada
- profundidad suficiente bajo un recubrimiento protector. En el presente caso, las calizas están cubiertas por arcillas y areniscas del Mioceno superior. En cuanto al basamento paleozoico, está cubierto por el Mioceno inferior.

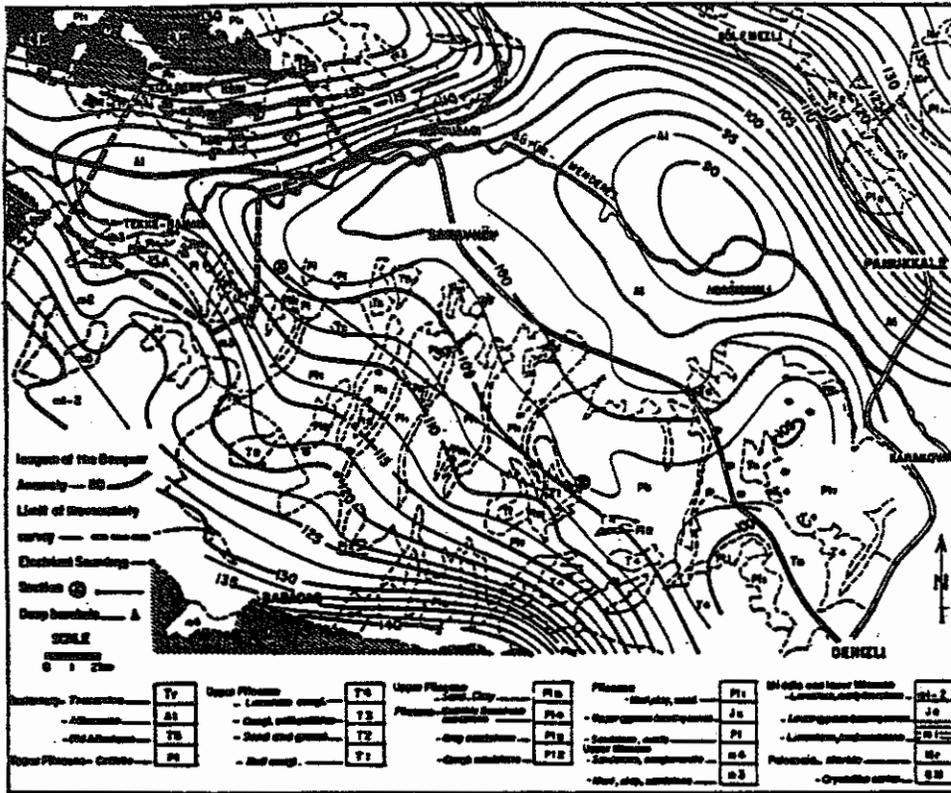
El primer reconocimiento geofísico consiste en un estudio gravimétrico. El mapa de la anomalía de Bouguer (Fig. 2) y el mapa de la segunda derivada ponen en evidencia una enorme depresión que sigue el curso del río Büyük Menderes, con una especie de meseta entre Tekke Haman y Kizildere.



. Location of the geothermal field of Denizli in Western Anatolia

Duprat 1971

Fig. 2



Geological sketch and gravity map (Fig. 2) of the Denizli - Sarıvelly region

Duprat 1971

El basamento asciende rápidamente sobre las laderas Norte y Sur del foso. La ladera sur muestra dos estructuras gravimétricas relativamente profundas (Sarakoy - Babadag y al Oeste de Karakova). La interpretación de la sección AB (Fig. 3) da una idea de la profundidad de la estructura de Babadag.

Después de este primer estudio, tres sectores fueron seleccionados para el estudio de detalle :

- Tekke Haman - Kizildere
- Babadag
- Karakova

Después de esta campaña se efectuó un estudio eléctrico (sondeos eléctricos en corriente continua) y se realizaron perforaciones para medir el gradiente de temperatura.

La interpretación de los sondeos eléctricos ha proporcionado un mapa de isobatas de los niveles resistentes, (calizas miocenas o basamento paleozoico) bajo el recubrimiento conductor (arcillas miocenas). Este mapa (Fig. 4) muestra una serie de discontinuidades eléctricas que probablemente se deben a fallas. La interpretación geológica de los sondeos eléctricos realizada en el campo está representada en la figura 5.

Puede ser comparada con la sección de la figura 6, establecida en base a los resultados de las perforaciones realizadas después de terminado el estudio. Estas dos secciones presentan potentes analogías. Nótese sin embargo, que las calizas miocenas se tornan parcialmente más margosas y poco permeables por lo cual pierden la posibilidad de ser considerados como un yacimiento potencial. Este es el caso de las perforaciones KD VII y KD VI, en que el único acuífero de interés está representado por el basamento. La continuidad de las calizas que parecía estar indicada en las secciones eléctricas, no es realmente efectiva y las facies de las calizas parece variar. Sin embargo, estas variaciones parecen estar localizadas, ya que las calizas se encuentran en las perforaciones KD I y KD VIII, a ambos lados de KD VI y KD VII.

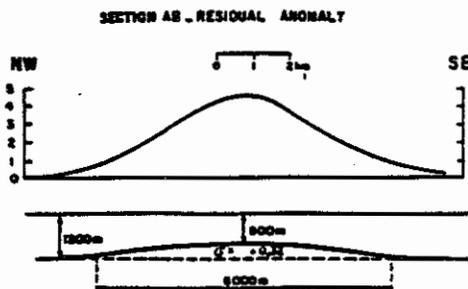


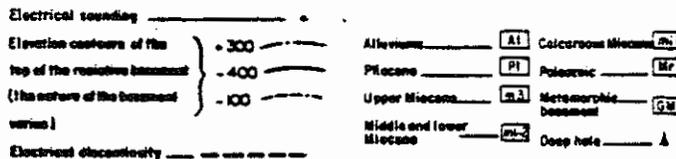
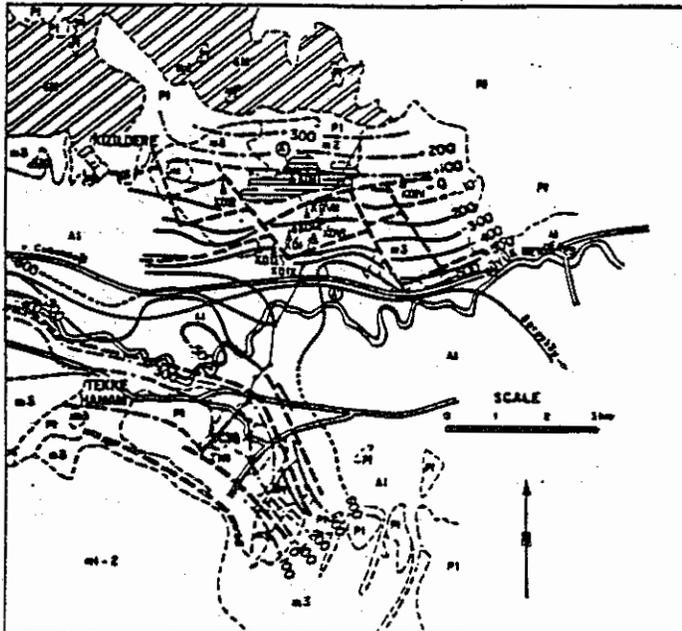
Fig. 3

Basement elevation deduced from section AB of the gravity map of figure 2

Duprat 1971

Fig. 4

Map of the top of resistive formations obtained by the interpretation of the electrical soundings. Several electrical discontinuities which can be considered to faults are visible (see Fig. 3)



Duprat 1971

<u>Número de pozo</u>	<u>Temperatura</u>
KD I	190° C
KD VI	200 C
KD VII	196° C
KD VIII	185° C
KD IX	170° C
KD III	180° C
KD III	165° C
KD IV	180° C

La tendencia indicada en la figura 7, está confirmada por el resultado de las perforaciones.

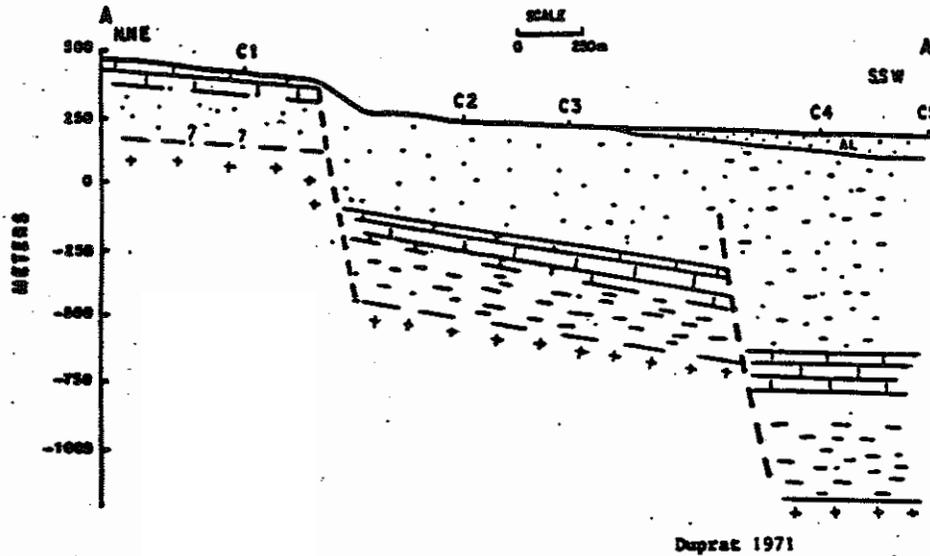
En el sector de Kizildere, el estudio geofísico ha mostrado que, teniendo en cuenta las condiciones tectónicas y la temperatura, la zona más favorable está ubicada en el compartimiento situado al Sur de la discontinuidad que marca el límite Sur de los afloramientos de calizas del Mioceno medio (Fig. 4). Es en esta zona donde se localizan los pozos más productivos : KD I, KD VII y KD VIII donde se produce una mezcla de agua y de vapor (400 t/h de fluido, que dan 8 % de vapor seco a 6 atmósferas para el pozo KD VI por ejemplo).

En la región de Takke Haman, se perforó solamente un pozo profundo. Interceptó las calizas miocenas almacenando aguas calientes a poca profundidad y penetró en el basamento (Fig. 5), cuya permeabilidad era demasiado baja para proporcionar una producción económica.

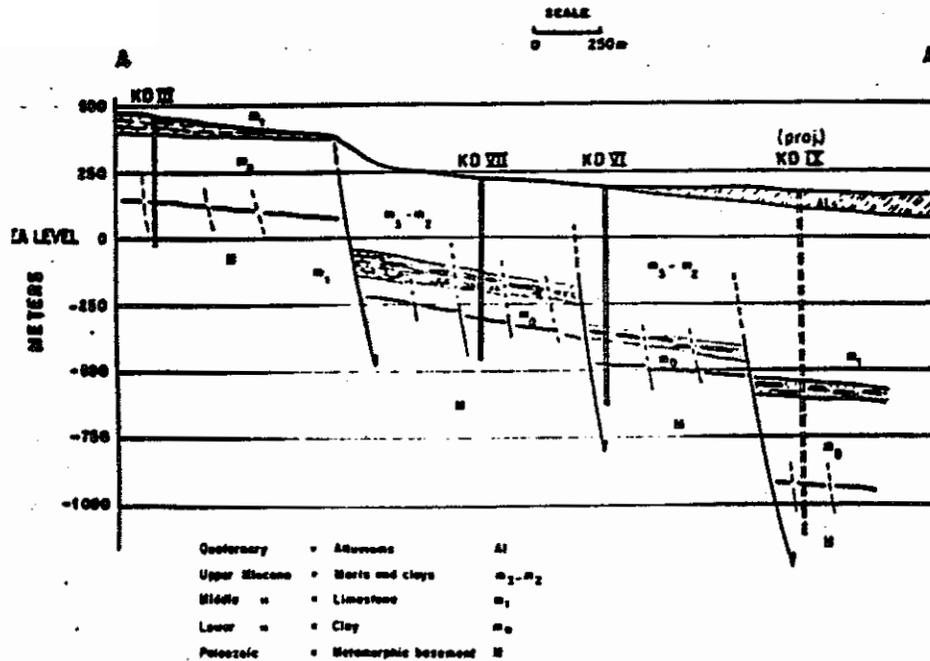
Por último, algunos sondeos eléctricos y medidas de gradiente de temperatura fueron realizados en las "estructuras" gravimétricas de Babadag y Karakova. Los S.E. mostraban que el nivel resistente más apropiado para ser un yacimiento potencial estaba ubicado aproximadamente entre 700 y 900 m de profundidad. Sin embargo, los gradientes de temperatura medidos eran muy débiles (0,7° C a 1,3° C/10 m) para ser considerados alentadores.

Geological interpretation of the resistivity results as drafted immediately after completion of the resistivity survey. This section should be compared to be certain.

Fig. 5



Section drafted after completion of the drillings. Note the similarities between the two sections.



Se han efectuado medidas de gradiente de temperatura entre Kizildere Y Tekke Haman. En esta última zona, las medidas de gradiente de temperatura no han sido consideradas como representativas, por lo tanto no han sido utilizadas; a menudo estaban afectadas por afluencias de agua caliente y gas. En cambio, en el sector de Kizildere, pudieron efectuarse medidas correctas gracias a la homogeneidad del recubrimiento impermeable. Las perforaciones eran generalmente profundas de 100 m y los detectores fueron ubicados a 60, 80 y 100 m. La figura 7 muestra el mapa del gradiente de temperatura establecido a partir de estas medidas. Este mapa muestra una serie de valores elevados (4° C/10 m), localizados al interior de una faja aproximadamente Este-Oeste, que permanece abierta al Oeste.

Las profundidades del substratum resistivo obtenidas a través de la interpretación de los sondeos eléctricos, fueron comparadas a las del yacimiento, asumiendo que su temperatura es de 200° C. Estas profundidades fueron calculadas en cada punto utilizando los valores del gradiente de temperatura, y la temperatura medida en la perforación a la profundidad de 100 m. La relación de las dos profundidades ha sido indicada, en cada punto, en la figura 8.

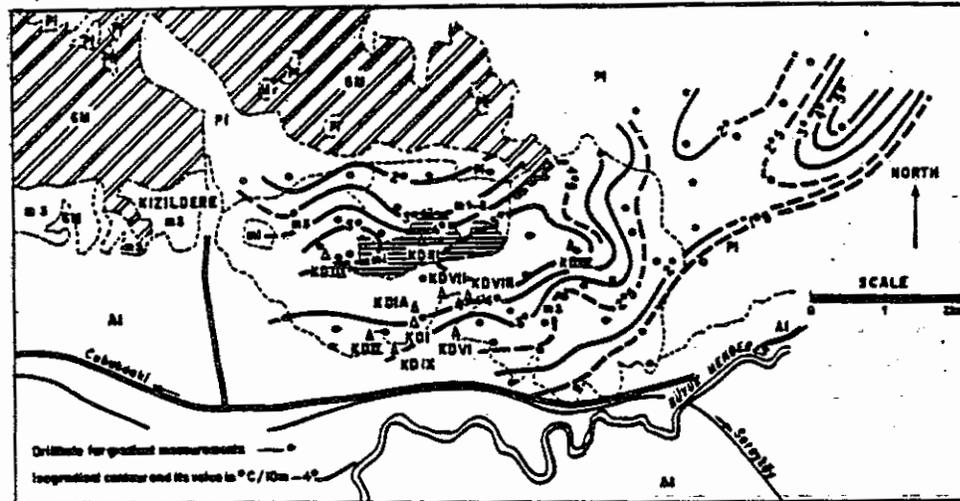
$$Y = \frac{\text{profundidad proporcionada por el sondeo eléctrico}}{\text{profundidad estimada a partir del gradiente de temperatura}}$$

Fig. 6

Los valores inferiores a 1, deberían corresponder a temperaturas inferiores a 200° C. Nótese que las temperaturas más elevadas están localizadas en una faja estrecha definida por el contorno $\gamma = 1$.

Isograds contours based on a series of 100 drillholes. Note a zone of strong gradient larger than 4° per 10 metres

Fig. 7

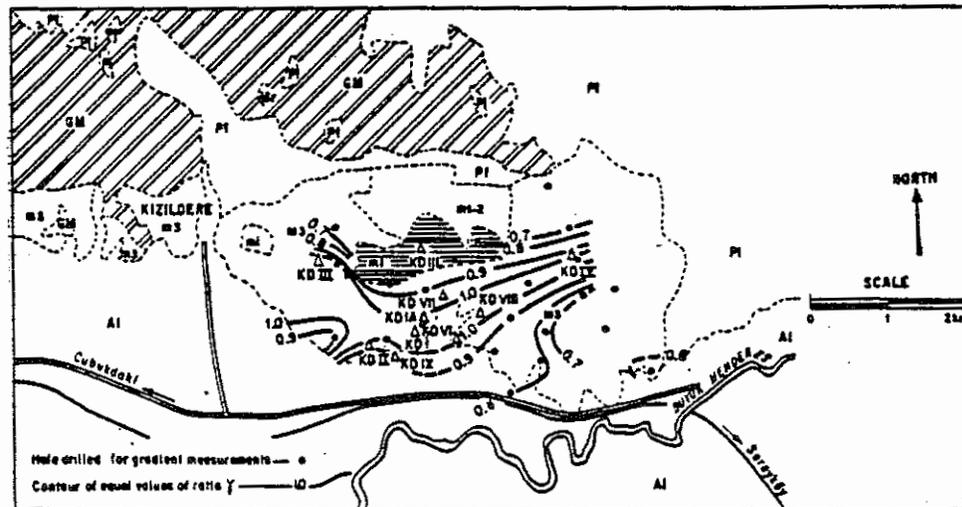


Duprat 1971

GEOLOGICAL LEGEND (Fig. 10-8)

Albanians	A1	Calcareous Micas	ms
Pliocene	P1	Paleozoic	m2
Upper Miocene	m3	Barometorphic Basement	GM
Middle and lower Miocene	m1-2	Deep drillhole	A

Fig. 8



Duprat 1971

Contours of equal values of the ratio:

$$\gamma = \frac{\text{depth of reservoir deduced from Electrical Soundings}}{\text{calculated depth of a reservoir at } 200^{\circ}\text{C}}$$

Ratioes larger than one correspond to temperatures higher than 200°C

3.5.1. LA EVALUACION DE LOS RECURSOS GEOTERMICOS EN ESTADOS UNIDOS

L. J. Patrick Muffler
U.S. Geological Survey
(Servicio Geológico de Estados Unidos)

ABSTRACTO

La evaluación de los recursos geotérmicos consiste en la estimación de la energía termal de la tierra con referencia a la temperatura media anual, junto con la estimación de la cantidad de esa energía que podría ser extraída económica y legalmente, en algún tiempo futuro. Durante la última década, el Servicio Geológico de Estados Unidos (United States Geological Survey - USGS), ha realizado tres evaluaciones de los recursos geotérmicos en los Estados Unidos. Las dos primeras, en 1975 y 1978 proporcionaron estimativas de los recursos geotérmicos para sistemas de convección hidrotermal a temperaturas $\geq 90^{\circ}\text{C}$ y para sistemas geopresurizados. La tercera evaluación (1982) fue restringida a los recursos geotérmicos $< 90^{\circ}\text{C}$.

INTRODUCCION

La evaluación de recursos se puede definir como la estimación, en términos generales, de los suministros futuros de minerales y combustibles. Esta evaluación incluye, tanto las cantidades que se podrían producir bajo las actuales condiciones económicas, como las cantidades todavía no descubiertas, o las que podrían ser producidas con una tecnología mejorada, o bajo diferentes condiciones económicas. Además, la evaluación de recursos requiere tomar en consideración la cantidad de material presente en una parte específica de la corteza de la tierra, así como de la fracción de dicho material que podría ser recuperada y

utilizada bajo las condiciones económicas, legales y tecnológicas adecuadas.

Los recursos geotérmicos consisten primordialmente, en la energía termal, y por ende, la evaluación de los recursos geotérmicos es la estimación de la energía termal en la tierra con referencia a la temperatura media anual, junto con la estimación de la cantidad de dicha energía que podría ser extraída económica y legalmente en algún tiempo futuro. La estimación del recurso geotérmico también debería incluir, estimaciones de la cantidad de sub-productos, que podrían ser producidos y utilizados económicamente en combinación con la energía térmica. Estos subproductos podrían ser metales o sales disueltos en fluidos geotérmicos salinos (por ejemplo, en los fluidos del sistema geotérmico del Mar Salton; White, 1968; Helgeson, 1968), o gases como el meta no disueltos en los fluidos geopresurizados (Wallace et al., 1979).

Una evaluación de recursos es una declaración hecha en un momento dado, utilizando un conjunto dado de datos y un conjunto dado de suposiciones con respecto a lo económico, la tecnología, etc. Con la mayoría de los productos, tanto los conjuntos de datos como los supuestos pueden cambiarse con rapidez: los datos principalmente en respuesta a las actividades de exploración; y los supuestos en respuesta al desarrollo de tecnología, la economía, las variaciones políticas, las limitaciones en cuanto al medio ambiente, la política social, etc. En consecuencia, una evaluación de recursos tiene un valor meramente transitorio, y es necesaria su actualización en forma periódica. Este es el caso especialmente con un recurso como la energía geotérmica, en la que se incrementan rápidamente la exploración, el desarrollo, y el uso, y en la situación actual en la que todo el contexto de la energía está en un estado de movimiento constante a nivel mundial, mientras los países intentan enfrentarse con los recursos finitos de los combustibles fósiles, la contaminación ambiental, la eliminación de los desechos nucleares, etc.

RECURSOS GEOTERMICOS

Las estimaciones de los recursos geotérmicos de los Estados Unidos varían hasta seis órdenes de magnitud (Muffler, 1973), desde las más altas de 10 billones (10×10^9) de megavatio-siglos (MWe-c), hasta variaciones bajas de aproximadamente 10.000 MWe-c. Para darles un contexto a estas cifras, la capacidad de generación eléctrica de los Estados Unidos en 1979 fue de aproximadamente 600.000 MWe (Departamento Estadounidense de Energía, 1979, p. 139).

La razón en parte, para que exista discrepancia en la publicación de las estimaciones de los recursos geotérmicos, se origina con una confusión entre los términos recursos base, reservas y recurso. Estos términos vienen de las industrias del petróleo y los minerales. Se ha definido el recurso base "por Netschert (1958) y Schurr y Netschert (1960, p. 297) como ... la suma total de una materia prima mineral presente en la corteza terrestre, dentro de un área geográfica determinada...sea o no conocida su existencia, y sin tomar en cuenta las consideraciones de costos, ni de la factibilidad tecnológica de su extracción." Se ha definido la "reserva" por Flawn (1966, p. 10), como "las cantidades de minerales...que puede suponerse razonablemente que existen y que se pueden producir con la tecnología existente y bajo las condiciones económicas existentes." Y finalmente, se ha definido el "recurso" por Netschert (1958) y por Schurr y Netschert (1960, p. 297), como "...aquella parte del recurso base (incluyendo las reservas) que se piensa que probablemente llegaría a estar disponible, dadas ciertas condiciones tecnológicas y económicas."

Se utiliza el término "factor de recuperación" en las industrias petrolera y minera, para referirse a la relación entre los materiales (o la energía) que puede recuperarse y los materiales (o la energía) "in situ". Los factores de recuperación pueden ascender a 1 para unos pocos depósitos metálicos, pero para la mayoría de los minerales y las fuentes de energía es substancialmente menor a 1. El factor de recuperación para el carbón de extracción profunda, actualmente es de aproximadamente el

50 por ciento (Schanz, 1975). La evaluación del petróleo en 1975 por el USGS en los Estados Unidos (Miller, et al., 1975), se utilizó un factor de recuperación del 60 por ciento para el cálculo de los recursos, y un factor de recuperación del 32 por ciento para calcular las reservas. El factor de recuperación del gas natural es de aproximadamente el 80 por ciento (Schanz, 1975).

Con estos antecedentes, propusieron Muffler y Cataldi (1978), una terminología lógica para los recursos, y específicamente para la energía geotérmica. Se definió el "recurso geotérmico base", como todo el calor que contiene la corteza terrestre, debajo de un área específica, medida a partir de la temperatura media local anual.

El "recurso base accesible", se definió como la energía térmica a profundidades lo suficientemente limitadas, para permitir su explotación en el futuro previsible. El recurso geotérmico, se definió como aquella fracción del recurso base accesible que se pueda extraer económica y legalmente en algún momento razonable en el futuro. El recurso geotérmico se puede dividir en categorías económicas y subeconómicas, dependiendo de la economía actual.

Se puede representar esta lógica como el eje vertical (grado de factibilidad económica) de un diagrama McKelvey, (fig. 1). El grado de seguridad geológica se representa como el eje horizontal, y se divide en sus componentes identificados y no identificados. El recurso comprende la parte superior del diagrama. La reserva geotérmica se especifica como la porción del recurso que está identificada y económicamente accesible en la actualidad (es decir, el cuadro superior al lado izquierdo).

Las relaciones cuantitativas entre el recurso base accesible, el recurso y la reserva, pueden ilustrarse con los resultados de una evaluación de recursos geotérmicos realizada recientemente en el centro y sur de Toscana, Italia (fig. 2). Nótese que el recurso constituye únicamente el 2.5% del recurso base accesible. Es más, de un recurso base accesible de 187.000×10^9 vatios año (térmicos), se estima una fuerza eléc-

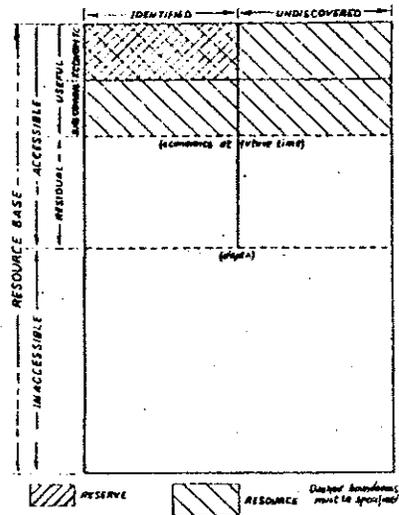


Figure 1. McKelvey diagram for geothermal energy, showing derivation of the terms resource and reserve (from Muffler and Cataldi, 1978). Vertical axis is degree of economic feasibility; horizontal axis is degree of geologic assurance.

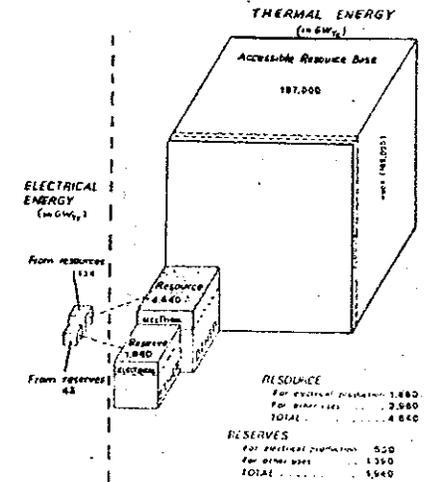


Figure 2. Block diagram illustrating the amounts of electrical energy producible from the geothermal resource and from the geothermal reserve of central and southern Tuscany (from Cataldi et al., 1978). The volume of the cubes is proportional to the energy content.

Table 1. Results of the 1982 USGS geothermal resource assessment of the United States (from Muffler, 1979b, table 20).

	Accessible resource base		Accessible fluid resource base to 6.85 km (10-18 J)	Accretion resource base to 3 km (10-19 J)		Resource (10 ¹⁸ J)	Electricity (MWe for 30 yr)	Beneficial heat (10 ¹⁸ J)
	to 10 km (10-18 J)	to 7 km (10-18 J)		to 10 km (10-18 J)	to 3 km (10-19 J)			
Conductor-dominated								
Land area	33,000,000 ^a	17,000,000 ^b			3,300,000 ^c			
Offshore Gulf Coast	370,000 ^c	180,000 ^c			36,000 ^c			
Total	33,000,000	17,200,000			3,300,000			
Igneous-related								
Evaluated	101,000							
Unevaluated	>800,000							
Total	>1,000,000							
Reservoirs of hydrothermal convection systems (200°C)								
Identified								
Undiscovered								
Total								
				950 ^d				
				2800-4900	3100-5200	700	400	23,000
				3800-5800	3800-5900	8000	2000	72,000-127,000
						9600	2400	95,000-150,000
								230-350
Northern Gulf of Mexico basin (onshore and offshore)								
Thermal energy	850,000 ^e	410,000 ^e	11,000	96,000	107,000			
Methane energy	6,000	57,000	63,000					
Total	17,000	153,000	170,000					
Other geopressed basins				46,000 ^h				

^aBest estimates of Diment and others (1975, table 14). These values are each approximately 10 percent greater than the values determined by the "basic calculation" of Diment and others (1975, table 13).
^bEquations on P. 85 and 91 of Diment and others (1975) (assuming an exponential decrease of heat production with depth) give 13,700,000 x 10¹⁸ J for the "basic calculation". This value is then increased by approximately 18 percent to give a figure comparable to the "best estimates" of Diment and others (1975, table 14).
^cCalculated for an area of 135,000 km² using the "basic calculation" of Diment and others (1975) and the thermal parameters listed for the coastal plain on their table 13. The result is then increased by approximately 18 percent to give a figure comparable to their "best estimates".
^dDoes not include 1290 x 10¹⁸ J in National Parks (mainly Yellowstone).
^eCalculated for an area of 310,000 km² using the "basic calculation" of Diment and others (1975) and the thermal parameters listed for the coastal plain on their table 13. The result is then increased by approximately 18 percent to give a figure comparable to their "best estimates".
^fTable 1 of Partridge, Wallace, Woodruff, and Taylor (1975).
^gSpin 2 of Partridge, Wallace, Woodruff, and Taylor (1975).
^hFrom White and Williams (1975, table 28); thermal energy only.

trica de únicamente 134 x 10⁹ vatios-año (eléctrica) del recurso geotérmico.

LAS EVALUACIONES DE LOS RECURSOS GEOTERMICOS DE LOS ESTADOS UNIDOS

En los Estados Unidos, la evaluación de los recursos geotérmicos, (hecha la distinción entre ésta y la estimación de las reservas geotérmicas), es la responsabilidad del Departamento de Geología de los Estados Unidos (USGS). En el cumplimiento de esta responsabilidad, el USGS ha realizado durante el decenio pasado, tres evaluaciones de los recursos geotérmicos (White y Williams, 1975; Muffler, 1979a; Reed, 1983a). Las dos primeras de estas evaluaciones trató todas las categorías de la energía geotérmica; la tercera se limitó a la evaluación de los recursos geotérmicos de menos de 90°C.

En la evaluación de recursos geotérmicos que realizó el USGS en 1975, la primera evaluación comprensiva de los recursos geotérmicos de los Estados Unidos, se evaluó la energía geotérmica en cuatro categorías:

1. Los regímenes regionales de conducción dominante
2. Los sistemas geotérmicos relacionados a rocas ígneas
3. La energía geotérmica-geopresurizada
4. Los sistemas de convección hidrotérmica a temperaturas $\geq 90^\circ\text{C}$.

Las estimaciones de los recursos geotérmicos, definidos en la sección anterior, se hicieron únicamente para las categorías 3 y 4. Los cálculos energéticos hechos para las categorías 1 y 2, fueron útiles para proporcionar un marco conceptual aparente de los sistemas geopresurizados e hidrotérmicos, pero no constituyeron una estimación real de los recursos. La evaluación de recursos geotérmicos del USGS en 1975, expresamente no involucró los recursos geotérmicos a temperaturas menores a los 90°C.

A inicios de 1979, el USGS publicó una evaluación refinada y actualizada de los recursos geotérmicos de los Estados Unidos (Muffler, 1979a), en base a los datos disponibles hasta el 1 de julio de 1978. Esta evalua-

ción siguió en forma general la metodología de la evaluación de 1975, y partes de la evaluación anterior que seguían válidas no fueron repetidas. Se aumentaron tres secciones importantes a la evaluación de 1978: 1) un informe describiendo y representando en fotografías, las áreas favorables para el descubrimiento y desarrollo de aguas termales de baja temperatura ($<90^{\circ}\text{C}$), es de profundidades menores a 1 kilómetro (Sammel, 1979); 2) una técnica estadística para la estimación de la energía geotérmica, en los sistemas identificados de convección hidrotérmica de $\geq 90^{\circ}\text{C}$, y 3) tres mapas grandes a colores representando una variedad de datos geotérmicos. La tabla 1 da un resumen de los resultados de esta evaluación de 1978.

La evaluación de los recursos geotérmicos de los Estados Unidos en 1978, incluyó una recopilación de datos sobre manifestaciones de agua termal de baja temperatura, menos de 90°C (Sammel, 1979), pero no se hizo ningún intento de estimar la energía asociada. No obstante, en 1983, el Departamento Geológico Estadounidense publicó, una evaluación cuantitativa de los recursos geotérmicos de bajas temperaturas (menos de 90°C) en los Estados Unidos (Reed, 1983a).

Ambientes conductivos regionales

Dimet et al. (1975), estimó la energía térmica en los ambientes conductivos regionales en $33'000.000 \times 10^{18}$ joules. Este número es útil principalmente, como un valor de referencia o un límite superior, para cualquier discusión sobre la energía geotérmica en los Estados Unidos. La estimación incluye implícitamente a la energía geotérmica en las cuencas geopresurizadas; en las cuencas sedimentarias a presión hidrostática; en los sistemas de convección hidrotérmica no relacionados con intrusiones ígneas jóvenes rocas de porosidad y permeabilidad bajas.

Recursos geotérmicos geopresurizados

Las zonas geopresurizadas se conocen en muchas cuencas sedimentarias de los Estados Unidos (Wallace et al., 1979, fig. 26), pero la enorme can-

tidad de energía geotérmica geopresurizada, se encuentra localizada en la parte norteña de la cuenca del Golfo de México; únicamente para esta área se han hecho las estimaciones cuantitativas. A partir del trabajo anterior de Papadopulos et al. (1975), Wallace et al. (1979) estimó los recursos geopresurizados-geotérmicos del norte de la cuenca del Golfo de México, hasta la profundidad de casi 7km, utilizando datos de más de 3500 pozos. Dependiendo de cuál de los esquemas de recuperación de Papadopulos et al. (1975) se utilice, el recurso geopresurizado-geotérmico está entre 430×10^{18} y 4400×10^{10} joules. Esta energía está integrada aproximadamente de cantidades iguales de energía térmica y energía del metano disuelto en las aguas, con pequeñas cantidades de energía mecánica procedente de las altas presiones. El recurso geopresurizado-geotérmico del norte de la cuenca del Golfo de México, es el equivalente de $75-780 \times 10^9$ barriles de petróleo, u 8 a 85 años de petróleo a la tasa de consumo actual de los Estados Unidos.

Energía geotérmica relacionada con actividad ígnea

Superimpuesta por el medio ambiente conductivo regional, está la energía geotérmica relacionada a intrusiones ígneas jóvenes, contenida en magma, en roca ígnea solidificada, en roca madre caliente, o en sistemas asociados de convección hidrotérmica. Para este tipo de sistemas geotérmicos con relación ígnea, la energía térmica que persiste todavía en las intrusiones de sílice y la roca madre adyacente, fue calculada mediante modelos de enfriamiento conductivo, utilizando estimaciones del tamaño y la edad de las intrusiones (Smith y Shaw, 1979). Este cálculo se basa en la suposición de que el enfriamiento del cuerpo ígneo, mediante la convección hidrotérmica, fue compensado por los efectos del precalentamiento magnético y los aumentos de magma después de producido el su puesto emplazamiento (Smith y Shaw, 1975). La energía total en los sistemas con relación ígnea, que fueron evaluados hasta la profundidad de 10 km, fue calculada en 100.000×10^{18} joules. Smith y Shaw (1979) también estiman, que la energía en los sistemas para los cuales no está disponible la información adecuada sobre su edad y volumen, es de 900.000×10^{18} joules, mayor con casi un orden de magnitud. Las estima-

ciones aproximadas sugieren que el 50 por ciento de la energía está en el magma, el 43 por ciento en la roca seca caliente, y el 7 por ciento en los sistemas de convección hidrotérmica (Muffler, 1979b).

Sistemas de convección hidrotérmica >90°C

Para la evaluación de los recursos geotérmicos, el USGS tanto en 1975 como en 1978, calcularon la energía geotérmica en los sistemas identificados de convección hidrotérmica >90°C, estimaron la energía térmica que quedaba aún por descubrirse, y luego estimaron la fracción de la energía térmica total que podía recuperarse (Renner et al., 1975; Nathenson y Muffler, 1975; Brook et al., 1979). Para los sistemas identificados, ambas evaluaciones utilizaron un método en el que se consideró la temperatura, el área, y el grosor de los reservorios hasta la profundidad de 3 km en los sistemas identificados de convección hidrotérmica.

Las temperaturas subsuperficiales fueron estimadas o tomadas de los datos de las perforaciones (si éstos estaban disponibles), o aplicando varios geotermómetros químicos a los fluidos geotérmicos de las perforaciones o de los nacimientos termales. Los métodos utilizados por el USGS para estimar las temperaturas subsuperficiales, se describen detalladamente en Brook et al. (1979, pp. 21-23). Refinamientos adicionales a los geotermómetros lo realizó Fournier (1981 - 1982).

El área de un reservorio es la mayor incógnita para estimar la energía del mismo. Únicamente en muy pocos sistemas geotérmicos se ha determinado el área aproximada del reservorio mediante la perforación. Por ende, debe emplearse la evidencia indirecta para estimar el área de casi todo sistema. La siguiente cita de Brook et al. (1979, p. 23), ilustra el procedimiento seguido por el USGS en 1978:

"Cuando la única evidencia de la existencia de un reservorio de agua caliente, es un sólo manantial o pozo, o grupo de nacimientos en un área pequeña, se ha supuesto un área mínima de 1 km^2 y un máximo de 3 km^2 , con un

más probable de 2 km^2 . Se considera que estas estimaciones uniformizadas son representativas de los sistemas más pequeños y son comparables a las áreas determinadas para muchos sistemas similares, con los cuales, la evidencia geofísica o geológica formó la base de nuestras estimaciones. Donde dos o más nacimientos o pozos de un área tienen agua de composición química similar y la geología superficial sugiere que podrían reflejar un reservorio común, se supone que el límite inferido del reservorio comprende los pozos y nacimientos. La extensión de la alteración en la superficie a veces indica el tamaño de un reservorio subyacente. Si el flujo calórico o la anomalía del gradiente térmico, asociado con un sistema, ha sido definido, esta información suele ser un buen indicador del área del reservorio. Las anomalías de baja resistividad se relacionan a muchos sistemas hidrotérmicos, y a veces se puede utilizar la extensión de la anomalía para estimar el área del sistema. Los estudios gravimétricos, sísmicos activos y pasivos, y magnéticos, también proporcionan datos útiles para estimar el área de un reservorio".

La mayoría de las estimaciones del grosor de los reservorios también están sujetas a la incertidumbre, pero la gama de dicha incertidumbre no es tan amplia como la variedad de inseguridades respecto al área. Casi todas las evaluaciones de los recursos suponen la presencia de un grosor uniforme para toda el área del reservorio, principalmente porque los datos para la mayoría de los sistemas no justifican un refinamiento más allá de este modelo sencillo. En 1978, el USGS, asumió que el fondo de todo reservorio quedaba a los 3 km de profundidad a menos que hubiera evidencia que sugiriera un valor menor. Cuando se disponía de estudios de perforación o geofísicos, se los utilizó como guías para estimar la cima del reservorio; en particular, se utilizaron comúnmente perfiles de gradientes de temperatura para determinar los

límites superiores de los reservorios geotérmicos. En la ausencia de datos geofísicos o geológicos pertinentes, se asumieron una profundidad mínima de 0,5 km, una profundidad máxima de 2,0 km, y una profundidad más probable de 1.5 km hasta la cima del reservorio.

En la evaluación (USGS de 1975), se hizo una sola estimación para cada variable (temperatura, área y grosor) en cada sistema. Sin embargo, en 1978 se hicieron tres estimaciones para cada variable, en cada sistema. Estas estimaciones fueron con los valores mínimo, más probable y máximo para una densidad de probabilidad triangular aproximándose lo más posible a la estimación de la densidad de probabilidad real de la variable. Seguidamente se calcularon energías asumiendo un calor específico volumétrico constante.

A continuación se calcularon las medias y las desviaciones típicas y se las sumaron analíticamente, para saber la media y la desviación típica de la energía térmica en todos los sistemas de convección hidrotérmicos identificados ($1650 \pm 140 \times 10^{18}$ J, excluyendo los Parques Nacionales). Se utilizaron los métodos de Monte Carlo, para dar las distribuciones resultantes de probabilidad para la energía en los sistemas de temperatura $> 150^\circ\text{C}$, de 90°C a 150°C , y el total de todos los sistemas de temperatura $\geq 90^\circ\text{C}$.

Seguidamente se utilizó un factor uniforme de recuperación geotérmica del 25 por ciento, para calcular la energía térmica recuperable (el recurso) en los sistemas identificados de convección hidrotérmicos (Nathenson, 1975). Se asumió que la densidad de probabilidad del factor de recuperación era triangular, con un mínimo de 0, un máximo de 50 por ciento, y un valor más probable del 25 por ciento. Nuevamente se utilizaron los métodos Monte Carlo para dar las distribuciones de probabilidad indicadas en la figura 3.

La electricidad se calculó únicamente para los sistemas de convección hidrotérmicos, con temperatura de reservorio $> 150^\circ\text{C}$. Primeramente se calculó todo el trabajo disponible. Entonces se redujo el resultado

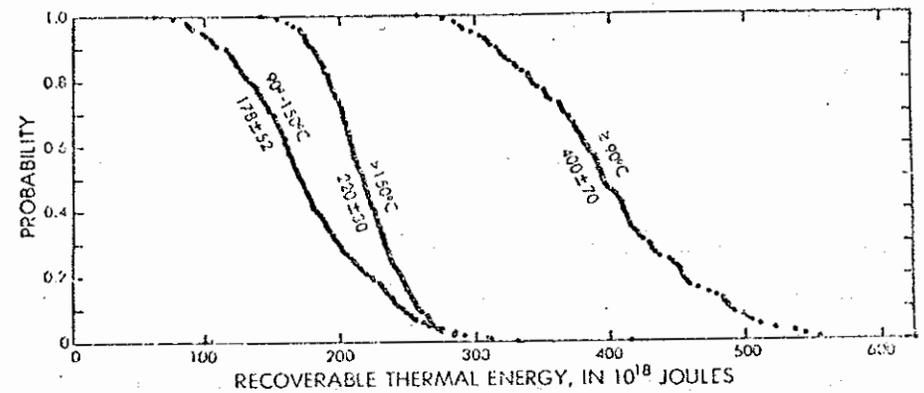


Figure 3. Monte Carlo sample distributions for recoverable thermal energy (resource) from identified hydrothermal convection systems with reservoir temperatures 90°C – 150°C , $< 150^\circ\text{C}$, and $< 90^\circ\text{C}$ (from Brook et al., 1979, Figure 8). Systems in National Parks excluded. Vertical axis gives the probability that recoverable thermal energy is greater than or equal to a value indicated on the horizontal axis. Mean and standard deviation shown for each curve in units of 10^{18} joules.

utilizando un factor igual a 0,4 para los sistemas de líquido dominante y 0,5 para los sistemas de vapor dominante (Brook et al., 1979, p. 26) para dar la capacidad eléctrica de 23.000 ± 3400 MWe en 30 años.

Para los sistemas de convección hidrotérmicos de temperaturas intermedias ($90^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$), las evaluaciones de 1975 y 1978 señalaron el calor aprovechable, asumiendo una baja de temperatura de 32°C a 150°C ó de 20°C a 100°C ; en cualquiera de los dos casos, el calor aprovechable se calculó como el 24 por ciento del recurso de temperatura intermedia.

Además de este inventario de sistemas hidrotérmicos de convección conocidos, fue necesario estimar la energía geotérmica que quedaba por descubrir en dichos sistemas. Esta energía consiste : 1) la energía adicional debida a las revisiones de los volúmenes de los sistemas identificados, 2) la energía térmica adicional debida a las revisiones de las estimaciones de temperatura de los sistemas identificados, y 3) la energía térmica en los sistemas que no han sido identificados todavía. En la mayoría de los casos, Brook et al. (1979), estimó el componente no descubierto por provincia geológica como múltiplo del componente identificado. Para Island Park, Idaho, y la cadena volcánica Aleutiana de Alaska, se estimó el componente no descubierto, como el uno por ciento de la energía térmica contenida en el correspondiente sistema de relación ígnea. Luego se analizó el componente no descubierto en categorías de temperatura alta e intermedia, en base a la extrapolación de los datos numéricos, tamaño, y temperatura del componente identificado.

El componente identificado (400×10^{18} J) más el componente sin descubrir (2000×10^{18} J), da un total de 2400×10^{18} , para el recurso geotérmico de todos los sistemas de convección hidrotérmicos, hasta la profundidad de 3 km. Esta cifra es el equivalente de 430×10^9 barriles de petróleo, o sea 47 años a la tasa actual de consumo de petróleo en los Estados Unidos. Dependiendo del balance entre los fluidos de temperaturas alta e intermedia en el componente no descubierto, esto totaliza energía eléctrica de $95.000 - 150.000$ MWe para 30 años, y un calor aprovechable de $230 - 350 \times 10^{18}$ J. Estas estimaciones reflejan las dos suposiciones limitantes para la relación volumen/temperatura del componente no descubierto. Por tanto, el valor superior para la electricidad no puede aparecer con el valor superior del calor aprovechable.

Recursos geotérmicos de temperatura baja ($< 90^{\circ}\text{C}$)

La evaluación de los recursos geotérmicos de los Estados Unidos en 1978, incluyó una recopilación de datos sobre las manifestaciones de agua geotérmica de temperaturas bajas ($< 90^{\circ}\text{C}$) (Sammel, 1979), pero no se hizo ningún esfuerzo por estimar la energía asociada. Sin embargo, en 1983, el Departamento de Geología Estadounidense publicó una evaluación cuantitativa de los recursos geotérmicos de baja temperatura ($< 90^{\circ}\text{C}$) de los Estados Unidos (Reed, 1983a), en base a datos disponibles hasta abril de 1982.

De una manera similar Brook et al. (1979), al evaluar todos los recursos geotérmicos de bajas temperaturas del USGS en 1982, limitó el término "recursos base accesibles" a los reservorios geotérmicos porosos y

permeables que pueden producir agua para transportar la energía térmica hasta la superficie. Según Reed (1983b, p. 2) "La adopción de esta limitación refleja el punto de vista que juzga, que únicamente los sistemas de baja temperatura que tienen permeabilidad alta serán competitivos, en sentido económico, en el futuro previsible". Por tanto, esta restricción excluye la roca caliente impermeable, de ser considerada como recurso en medios ambientales conductivos regionales.

Los recursos geotérmicos de baja temperatura ocurren en dos tipos de sistemas geotérmicos: (1) sistemas de convección hidrotérmicos, y (2) sistemas de dominación conductiva (Sorey, Nathenson y Smith, 1983). Los sistemas de convección hidrotérmicos a temperaturas bajas son conceptualmente idénticos a los sistemas de convección hidrotérmicos a temperaturas intermedias y altas; la circulación del agua transporta la energía térmica hasta reservorios a poca profundidad o hasta la superficie. En los sistemas de dominación conductiva, la circulación hacia arriba del fluido es de menor importancia que la existencia de gradientes altos verticales de temperatura en las rocas que incluyen acuíferos de extensión lateral significativa.

Para hacer la evaluación de baja temperatura, fue necesario definir un límite inferior de temperatura, para excluir las cantidades enormes de aguas freáticas de poca profundidad. Se expresó este límite mediante la función que muestra la figura 4. Esta función es esencialmente una línea con inclinación de 25°C por km, con una intercepción superficial a 10°C más que la temperatura media anual del aire ambiental.

La metodología utilizada en la evaluación de temperatura baja fue esencialmente igual a la empleada para las evaluaciones anteriores a temperaturas alta e intermedia, con la excepción del método usado para estimar la recuperación. Este método lo exponen Sorey, Nathenson y Smith (1983, p. 23) de la siguiente manera:

"El método utilizado aquí para calcular la energía recuperable involucra la estimación del número de pozos que cada reservorio puede sostener durante un período de desarrollo de 30 años, asumiendo que no se inyecte agua fría al reservorio. Aunque la ley pueda exigir la inyección de fluidos producidos luego de su utilización en la superficie, para proteger el medio ambiente en ciertas áreas; las temperaturas menores de reservorio y mayores áreas de reservorio hacen menos promisorios los planes para inyección en las áreas de recursos geotérmicos de baja temperatura que en las de temperaturas alta e intermedia. El método utilizado en esta evaluación de recursos, da lugar a la recarga inducida de agua de las regiones permeables que rodean cada reservorio térmico, mientras baje la presión en el reservorio. Así, el factor de recuperación se aproxima a 0.25 sobre 30 años para los reservorios de áreas reducidas.

"El recurso se calcula mediante la fórmula de

$$Q_{WH} = (p_c) \rho N Q P (t - t_{ref})$$

en la que Q_{WH} es el recurso, $(p_c)_f$ es el calor específico volumétrico del fluido ($4,13 / \text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$), N es el número de pozos de producción, Q es la descarga volumétrica media de cada pozo de producción, y p es el período de desarrollo. Se asume que las temperaturas de fluidos en el cabezal de pozo son iguales a la correspondiente temperatura del reservorio; la temperatura de referencia es 15°C."

N se da por $k (a/a_w)$, donde a = el área del reservorio, a_w = el área por pozo, y k = una constante para compensar por la transmisividad no uniforme del acuífero.

La estimación de a_w requiere la suposición de un plan de producción, la estimación de la transmisividad, y la especificación de si o no tienen fugas los lechos rocosos que encierran el acuífero. Sorey, Nathenson y Smith (1983), asumen un plan de producción que consiste en pozos a espacios regulares sobre una red cuadrangular, cada uno descargando a 31,5 l/s durante 30 años, con una reducción cumulativa de 152m en el centro del campo de producción. La aspiración adicional se calcula en base a las soluciones integrales exponenciales de Theis (1935), para los acuíferos artesianos con lechos de confinamiento sin fugas, y sobre las correspondientes soluciones de Hantush (1960), para los lechos de confinamiento que sí tienen fugas. Los detalles de los cálculos y estimaciones aparecen en las páginas 23-27 de Sorey, Nathenson y Smith (1983).

Las incertidumbres en los valores de t , a , a_w y k se expresan mediante densidades triangulares de probabilidad para los valores mínimo, máximo y más probable. Para k , los valores supuestos son 0; 1,0 y 0,5 respectivamente."

Con este método de cálculo de recursos, los factores de recuperación se aproximan a 0,25 para los reservorios de área reducida y a 0,001 para los reservorios de área muy extensa, los que ocurren en las cuencas

sedimentarias (Sorey, Nathenson y Smith, 1983, p. 24).

El concepto de "calor aprovechable" fue introducido por Nathenson (1975) y Nathenson y Muffler (1975), para referirse a la energía térmica que puede aplicarse directamente a su uso no eléctrico proyectado. Brook et al. (1979), calculó el calor aprovechable de los recursos de temperatura intermedia de los sistemas de convección hidrotérmicos, como una fracción fija (0,24) de la energía térmica en el cabezal de pozo. Sorey, Nathenson y Smith (1983), no obstante, refinaron el cálculo del calor aprovechable para tomar en cuenta la variación en la baja de temperatura utilizable como función de la temperatura del reservorio. El calor aprovechable medio se calcula mediante la fórmula

$$\bar{q}_{ben} = (pC) f (ka/a_w) QPA t,$$

en la que \bar{q}_{ben} es la energía térmica en (MW_t durante 30 años), $(pC)_f$ es el calor específico volumétrico del agua, Q es la masa producida, P es la duración del periodo de desarrollo, y At se calcula con la ecuación

$$At = 0,6 (\bar{t} - 25^\circ C)$$

siendo \bar{t} la temperatura media del reservorio.

Los recursos geotérmicos no descubiertos $< 90^\circ C$ en los Estados Unidos occidentales, fueron estimados por Mariner et al. (1983), para cada provincia geológica multiplicando el recurso base accesible identificado para dicha provincia por factores de 1, 2, 3, 5 ó 10. se calcularon el recurso y el calor aprovechable, suponiendo la misma relación del recurso (o del calor aprovechable) a la del recurso base accesible como la determinada para los reservorios geotérmicos identificado en la provincia. Los recursos geotérmicos no descubiertos $< 90^\circ C$ en los Estados Unidos centrales y orientales fueron estimados por Sorey, Reed, Foley y Tenner (1983) comparando los volúmenes de reservorios considerados favorables por la existencia de reservorios geotérmicos $< 90^\circ C$, con los volúmenes de los sistemas geotérmicos identificados $< 90^\circ C$ que se ubican en contextos geológicos similares.

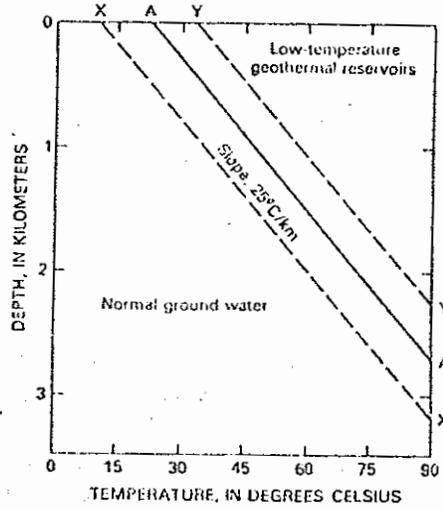


Figure 4. Temperature-versus-depth relation used to define low-temperature geothermal resources (from Reed, 1983a, fig. 1). Upper temperature limit is 90°C; lower temperature limit is defined as 10°C above the mean annual air temperature at the surface, increasing by 25°C/km with depth. Dashed lines X-X' and Y-Y' show minimum geothermal-resource temperatures required for mean annual air temperatures of 0°C and 23°C, which are the limits for air temperatures considered in the 1982 USGS geothermal resource assessment.

Table 2.—Summary of energies for high- and intermediate-temperature hydrothermal convection systems and for all low-temperature geothermal systems in the United States (adapted from Brook et al., 1979, table 11, and Reed, 1983b, table 13).

Type of system	Number of systems	Accessible Resource Base (10 ¹⁸ J)	Resource (10 ¹⁸ J)	Electricity (MWh for 30 yr)	Beneficial Heat (MWh for 30 yr)
Identified					
Hydrothermal Convection	1	24	9.3 ± 4.5	1630 ± 770	
Vapor-dominated	51	80	210 ± 30	21000 ± 3300	
>150°C					44000 ± 13700
90-150°C	163	700 ± 110	176 ± 55		13400 ± 420
<90°C	1119	200 ± 5.3	31 ± 0.85		29000 ± 2100
Conduction dominated	42	27000 ± 1070	56 ± 4.2		
TOTAL IDENTIFIED	1,376	29000 ± 1020	480 ± 63	23000 ± 3400	86000 ± 13900
Undiscovered					
Vapor-dominated and hot-water >90°C	8000	2000		72000-127000 ¹	194000-330000 ¹
<90°C	7200	66			30,000
TOTAL UNDISCOVERED	15200	2100		72000-127000¹	220000-360000¹
GRAND TOTAL	44,000	2600		95000-150000¹	310000-450000¹

¹ Ranges reflect different assumptions of volume of high- and intermediate-temperature systems as a function of temperature.

REFERENCIAS CITADAS

- Brook, C.C., Mariner, R.H., Mabey, D.R., Swanson, J.R., Guffanti Marianne, and Muffler, L.J.P., 1979, Hydrothermal convection systems with reservoir temperatures 90°C, in Muffler, L.J.P., ed., Assessment of geothermal resources of the United States - 1978: U.S. Geol. Survey Circ. 790, p. 18-85.
- Cataldi, R., Lazzarotto, A., Muffler, P., Squarci, P., and Stefani, G., 1978, Assessment of geothermal potential of central and southern Tuscany Geothermics, v. 7, 2-4, p. 91-132.
- Diment, W.H., Urban, T.C., Sass, H.H., Marshall, B.V., Munroe, R.J., and Lachenbruch, A.H., 1975, Temperatures and heat contents based on conductive transport of heat, in White, D.E., and Williams, D.L., eds., 1975, Assessment of geothermal resources of the United States-1975: U.S. Geol. Survey Circular 726, p. 84-103.
- Flawn, P.T., 1966, Mineral resources: Chicago, Rand McNally and Cp., 406 p.
- Fournier, R.O., 1981, Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering: in Rybach, L., and Muffler, L.J.P., eds., Geothermal Systems: Principles and Case Histories: Chichester, England, John Wiley & Sons, Ltd., p. 109-143.
- Fournier, R.O., 1982, Geochemistry in geothermal exploration and production: Proceedings of the Pacific Geothermal Conference, Auckland, New Zealand, p. 209-215.
- Hantush, M.S., 1960, Modification of the theory of leaky aquifers: Journal of Geophysical Research, v. 65, n° 11, p. 3713-3725.
- Helgeson, H.C., 1968, Thermodynamic and geochemical characteristics of the Salton Sea geothermal system: A. Jour, Sci, v. 266, p. 129-166.
- Mariner, R.H., Brook C.A., Reed, M.J., Bliss, J.D., Rapport, A.L., and Lieb, R.J., 1983, Low-temperature geothermal resources in the Western United States, in Reed, M.J., ed., Assessment of low-temperature geothermal resources of the United States-1982: U.S. Geological Survey Circular 892, p. 31-50.
- Miller, B.M., Thomsen, H.L., Dolton, G.L., Coury, A.B., Hendricks, T.A., Lennartz, F.E., Powers, R.B., Sable, E.G., and Varnes, K.L., 1975, Geologicla estimates of undiscovered recoverable oil and gas resources in the United States: U.S.Geol. Survey Circ. 725, 78 p.
- Muffler, L.J. P., 1973, Geothermal resources: in Brobst, D.A., and Pratt, W.P., eds., United States mineral resources: U.S.Geol. Survey Prof. Paper 820, p. 251-261.
- Muffler, L.J.P., ed., 1979a, Assessment of geothermal resources of the United States-1978: U.S. Geol. Survey Circ. 790, 163p.
- Muffler, L.P.J., 1979b, Summary, in Muffler, L.P.J., ed., Assessment of geothermal resources of the United States-1978: U.S. Geol. Survey Circ. 790, p. 156-163.
- Muffler, L.P.J., un press, Geothermal energy and geothermal resources of hydrothermal convection systems, in Ernst, W.G., and Perrine, R.L., eds., Energy: for ourselves and our Posterity: New York, Prentice Hall.
- Muffler, L.P.J., and Cataldi, R., 1978, Methods for regional assessment of geothermal resources: Geothermics, v. 7, N° 2-4, p. 53-89.
- Nathenson, Manuel, and Muffler, L.J.P., 1975, Geothermal resources in hydrothermal convection systems and conduction-dominated areas, in White, D.E., and Williams, D.L., D.L., eds., 1975, Assessment of geothermal resources of the United States-1975: U.S. Geol. Survey Circular 726, p. 104-121.

Neischert, B.C., 1958, The future supply of oil and gas: Baltimore Johns Hopkins University Press, 134 p.

Papadopoulos, S.S., Wallace, R.H., Jr., Wesselman, J.B., and Taylor R.E., 1975, Assessment of geopressed-geothermal resources in the northern Gulf of Mexico Basin, in White, D.E., and Williams, D.L., eds., 1975, Assessment of geothermal resources of the United States-1975: U.S. Geol. Survey Circular 726, p. 125-146.

Reed, M.J., ed., 1983a, Assessment of low-temperature geothermal resources of the United States-1982: U.S. Geological Survey Circular 892, 73 p.

Reed, M.J., 1983b, Introduction, in Reed, M.J., Ed., ed., Assessment of low-temperature geothermal resources of the United States-1982: U.S. Geological Survey Circular 892, p. 1-8.

Reed, M.J., 1983c, Summary, in Reed, M.J., ed., Assessment of low-temperature geothermal resources of the United States-1982: U.S. Geological Survey Circular 892, p.67-73.

Renner, J.L., White, D.E., and Williams, D.L., 1975, Hydrothermal convection systems, in White, D.E., and Williams, D.L., eds., 1975 Assessment of geothermal resources of the United States - 1975: U.S. Geol. Survey Circular 726, p. 5-57.

White, D.E., and Williams, D.L. eds., 1975. Assessment of geothermal resources of the United States- 1975: U.S. Geol. Survey Circular 726, 105 p.

3.5.2. APLICACIONES DE LA INGENIERIA DE YACIMIENTOS
EN LA EVALUACION DE UN CAMPO GEOTERMICO

Jesús Rivera Rodríguez
División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México

INTRODUCCION

Una vez descubierto un campo geotérmico mediante una o más perforaciones profundas, el papel de un ingeniero de yacimientos es fundamental en la determinación del tamaño del recurso, su contenido energético y de fluidos, así como de la definición de la capacidad de extracción, tanto por pozo, como a nivel campo. Toda esta información aunada con la obtenida de disciplinas afines, tales como la geología, geofísica, y geoquímica, traerá como consecuencia la definición adecuada del tamaño y número de unidades de generación eléctrica que se instalará en el campo geotérmico bajo estudio.

LA INGENIERIA DE YACIMIENTOS EN LA EVALUACION DE RECURSOS GEOTERMICOS

La fig. 1, describe en forma resumida los objetivos, que desde el punto de vista de la ingeniería de yacimientos, se tendrían que alcanzar con objeto de llegar a establecer una evaluación realística y fundamentada de los recursos geotérmicos aprovechables para la generación de electricidad. Con este fin, es necesario establecer una serie de parámetros básicos, que permitan caracterizar en forma adecuada, tanto las propiedades básicas de la roca, como también de los fluidos contenidos en espacio poroso y permeable del yacimiento.

Es conveniente establecer que la evaluación del potencial de un campo geotérmico es un proceso dinámico; ya que será necesario efectuar re

INGENIERIA DE YACIMIENTOS GEOTERMICOS

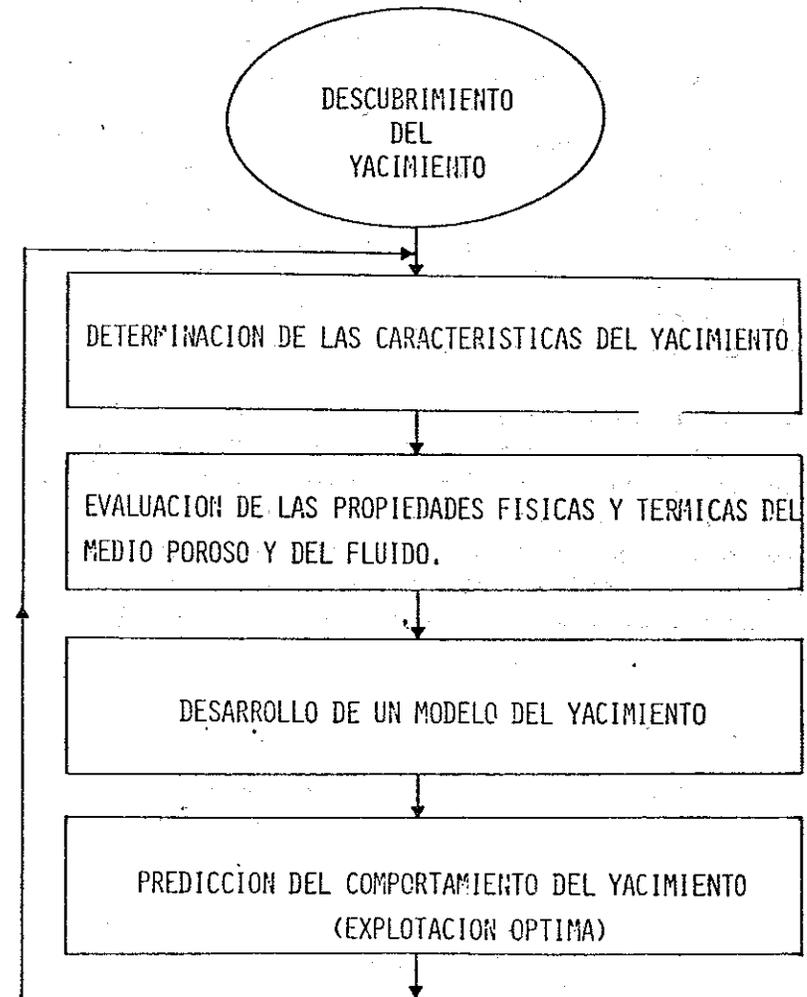


FIGURA No. 1

Principales objetivos perseguidos por la Ingeniería de Yacimientos.

visiones y afinaciones periódicas del mismo, a medida que nuevos datos provenientes tanto de pozos adicionales, como de estudios más detallados en los ya existentes, vayan siendo incorporados, lo que producirá como resultado magnitudes cada vez más cercanas a la realidad. La incertidumbre que se tiene con la evaluación del potencial de un campo en cualquiera de sus etapas de desarrollo, está directamente relacionada con la cantidad y calidad de los datos disponibles.

Cuando se ha localizado y comprobado la presencia de un recurso geotérmico que pueda ser explotable a nivel comercial, para proceder a su evaluación, es necesario definir en forma clara y precisa varios términos, tales como "recurso geotérmico" y "reserva geotérmica", con objeto de establecer en forma inequívoca, la porción de la energía contenida en el yacimiento que pueda ser transportada a la superficie y posteriormente convertida en electricidad.

En 1975, Nathenson y Muffler (1) y, posteriormente Muffler y Cataldi (2), establecieron una serie de definiciones que son de gran utilidad para formar un marco adecuado de referencia y estandarizar la terminología utilizada en la evaluación de reservas. Utilizando sus definiciones como base y complementándolas con las que son de uso común en otros campos como la minería y la explotación de petróleo, se proponen las siguientes definiciones, las cuales se sintetizan en la fig. 2.

1. Recurso geotérmico base

Es el calor contenido en la parte de la corteza terrestre localizada bajo una cierta área y que se mide a partir de la temperatura media anual.

En esta definición se considera todo el calor contenido bajo una cierta área, sea este recuperable o no e independientemente de cualquier consideración técnico-económica.

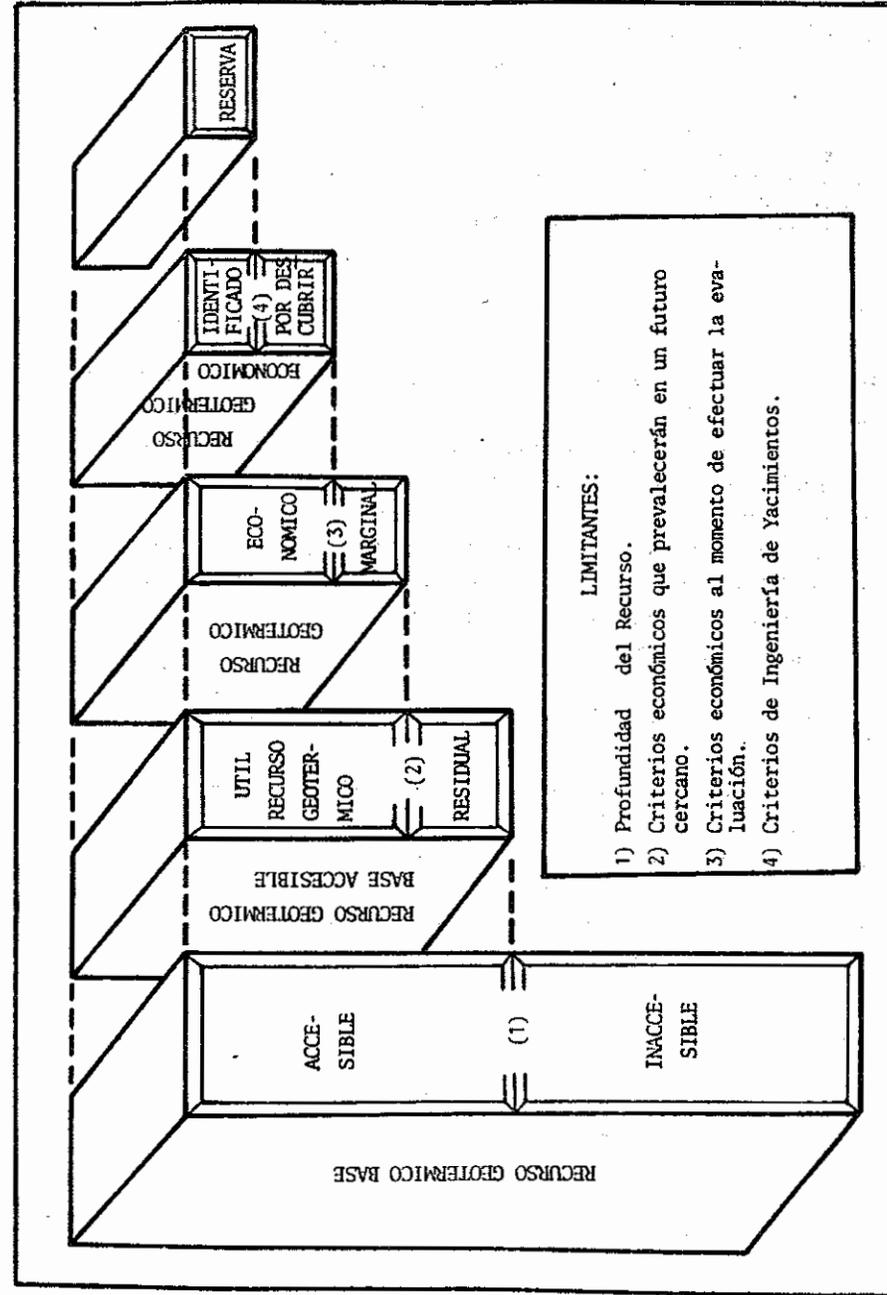


FIGURA No. 2

Concepto de Reserva Geotérmica de acuerdo con limitantes tecnológicas y económicas.

Dependiendo de la profundidad a que se localiza el recurso geotérmico base, éste podría dividirse en dos porciones (2); el recurso geotérmico base accesible, será aquella porción que puede alcanzarse mediante perforaciones profundas, de acuerdo con el estado de la tecnología respectiva a un tiempo dado. Aquella parte del recurso que no puede alcanzarse por limitaciones en las técnicas de perforación, sería el recurso geotérmico base inaccesible.

Por otra parte, el recurso geotérmico base accesible puede a su vez ser subdividido en dos partes: a la porción útil del mismo que puede ser extraída y transportada hasta la superficie en forma competitiva con otras formas de energía, se le denomina recurso geotérmico. La porción del recurso geotérmico base accesible que no cumple con estos requisitos será la parte residual del mismo.

Dentro del concepto de recurso geotérmico es conveniente considerar dos partes, atendiendo a los criterios económicos prevalecientes al momento de efectuar la evaluación. La parte que pueda ser producida de acuerdo con los criterios económicos prevalecientes a un tiempo determinado, de forma tal que resulte competitiva con otras formas de energía, será el recurso geotérmico económico. El resto será el recurso geotérmico marginal.

Siguiendo con este procedimiento, el recurso geotérmico económico puede dividirse de acuerdo con el grado del conocimiento que del mismo se tiene. Como sugieren Muffler y Cataldi (2), cuando una porción de este recurso ha sido comprobada mediante perforaciones profundas y su magnitud ha sido sustentada mediante datos de geología, geofísica, geoquímica e ingeniería de yacimientos, dicha porción será la reserva geotérmica. La parte restante, cuya magnitud puede inferirse de estudios geológicos y geofísicos generales, será el recurso geotérmico económico por descubrir.

Con objeto de complementar esta clasificación, la reserva geotérmica puede a su vez subdividirse en varias categorías:

1. Reserva geotérmica demostrada.- Es la porción de la reserva geotérmica que ha sido comprobada mediante varias perforaciones profundas y cuya magnitud ha sido corroborada mediante estudios de geología, geofísica y geoquímica, así como de ingeniería de yacimientos.

Atendiendo el grado de conocimientos que de un área se tiene, así como también a la cantidad y calidad de la información que de la misma se dispone, la reserva geotérmica demostrada puede, a su vez, ser subdividida en dos categorías:

a) Reserva Geotérmica probada

Es la parte de la reserva que puede estimarse como base en datos confiables provenientes de varias perforaciones profundas, las cuales han permitido ampliar y afinar la información previamente disponible a partir de estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos. Además, la estimación está firmemente apoyada por correlaciones que a través del campo se han realizado mediante estudios de ingeniería de yacimientos, con los cuales se incorporan datos de la productividad de los pozos.

b) Reserva geotérmica probable

Es la porción remanente de la reserva demostrada, cuya estimación se basa en información de alguna perforación profunda, así como datos escasos de geología, geofísica y geoquímica. También pueden tenerse estudios preliminares de ingeniería de yacimientos.

2. Reserva geotérmica posible.- Es la parte de la reserva que puede estimarse a partir de información preliminar de geología, geofísica y geoquímica, pero que no puede ser confirmada mediante los datos de alguna perforación profunda.

Esta categorización de la reserva geotérmica es consistente con la clasificación de reservas que se emplea en la industria petrolera y propo-

ciona, a juicio del autor, una de las formas más convenientes y lógicas para establecer un marco de referencia que permita evaluar, tanto el grado de desarrollo que guardan los recursos geotérmicos de un país o región, así como también la evolución que siguen los recursos de un campo específico.

Con objeto de asegurar un nivel de referencia común, es conveniente calcular las reservas con base en la cantidad de calor disponible en la boca del pozo, antes de que ocurra cualquier transformación o transporte del mismo.

Por otra parte, debe reconocerse que no todo el calor presente en el yacimiento puede ser conducido a la boca del pozo. En efecto, solo una pequeña parte del mismo puede ser transportado a la superficie. Para tomar en cuenta este hecho, es conveniente introducir un factor de corrección a la cantidad de calor presente en el yacimiento. Definiendo este factor como Factor de Recuperación Geotérmico, R, es posible establecerlo en la siguiente forma (2):

$$\text{Factor de Recuperación Geotérmico "R"} = \frac{\text{Calor extraído Medido en la cabeza del pozo}}{\text{Calor total originalmente contenido en un volumen determinado del yacimiento (fluidos + roca)}}$$

Adicionalmente a lo anterior, se debe considerar que para determinar la cantidad de electricidad que se producirá con el calor recuperable disponible a boca de pozo, será necesario aplicar al anterior un factor de eficiencia de conversión, el cual dependerá, entre otros factores, de las condiciones específicas de cada yacimiento, así como del tipo de proceso que se elija para la conversión de energía térmica a eléctrica.

Se considera que la terminología definida con anterioridad proporciona un marco de referencia adecuado, cuando se manejan los términos "recurso geotérmico" o "reserva geotérmica"; sin embargo, persiste todavía cierta ambigüedad y vaguedad, cuando se habla en términos del "potencial geotérmico de generación (o sólo "potencial") de un campo determinado. Por tanto, y tomando como base la metodología ya establecida por OLADE para las diferentes fases de un proyecto como son: reconocimiento y prefactibilidad y por último desarrollo y explotación, se propone el empleo de las siguientes definiciones:

1. Potencial geotérmico preliminar.- Es la capacidad de generación eléctrica, expresada en MW_e por 20 años, que puede definirse para un campo geotérmico, tomando en cuenta el estado de su conocimiento al final de la fase de reconocimiento y prefactibilidad.
2. Potencial geotérmico.- Es la capacidad de generación eléctrica, expresada en MW_e por 20 años, que puede definirse para un campo geotérmico, tomando en cuenta el estado de su conocimiento al final de la fase de factibilidad o de cualquier etapa ulterior de desarrollo.

Con el objeto de cuantificar en forma adecuada, la porción del potencial cuyo monto está mejor definido, se sugiere establecer una subdivisión del potencial geotérmico similar a la establecida para las reservas. Así, se puede establecer la siguiente subdivisión:

a) Potencial geotérmico probado

Es aquella parte del potencial que puede ser calculado con base en datos confiables de estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos y de ingeniería de yacimientos, los cuales han sido corroborados mediante perforaciones profundas. Además, se debe tener un factor de recuperación geotérmico razonablemente estimado para el campo, así como un factor de conversión de energía térmica a eléctrica comprobado para el esquema elegido.

b) Potencial geotérmico probable

Es la parte del potencial geotérmico que puede calcularse para la parte de un campo, en el cual no existen perforaciones profundas, o bien éstas son escasas y distantes de la parte conocida del campo; pero de la que sí se dispone de datos de geología, geofísica y geoquímica.

c) Potencial geotérmico posible

Es la parte del potencial de un campo que puede establecerse con base en datos preliminares y aislados, de alguna o varias disciplinas, tales como la geología, geoquímica y geofísica, pero los cuales no pueden ser comprobados, ya que no existe ninguna perforación profunda.

Esta clasificación del potencial geotérmico presenta la ventaja de que al referirse a cada uno de ellos en forma específica, queda sobrentendido tanto la fase en que se encuentra un proyecto en particular, así como el grado de certidumbre o incertidumbre que la cifra asociada al concepto representa.

Por otra parte, al definir el potencial de un campo, utilizando la subdivisión recomendada anteriormente, es posible ir incorporando al potencial geotérmico probado, las reservas probables contenidas en las partes del yacimiento que van siendo desarrolladas, a medida que la etapa de desarrollo del campo avanza. Así mismo, al avanzar este proceso, la parte del potencial que era considerado posible, pasa a incorporarse al potencial probable, con lo cual se establece un esquema dinámico de evaluación y conceptualmente consistente con la característica siempre evolutiva de un sistema geotérmico.

La ingeniería de yacimientos juega un papel preponderante en el establecimiento de las reservas o del potencial de un campo geotérmico, ya que reúne la información proporcionada por disciplinas afines, tales como la geología, geofísica y geoquímica, completándolos

con técnicas específicas, con las cuales puede ser estimado el potencial geotérmico, sea esta preliminar, probada, probable o posible.

Alguna de la información básica adicional necesaria para la evaluación de un recurso geotérmico, se refiere a propiedades del yacimiento tales como: la permeabilidad, porosidad, tipo de fronteras externas, recarga; tanto hidráulica como térmica, correlaciones de zonas productoras, etc. Parte de esta información puede obtenerse con base en pruebas de presión que se realizan en los pozos del campo. Una clasificación simplificada de los tipos de pruebas que pueden utilizarse es la siguiente:

I. Pruebas que se realizan utilizando un solo pozo

- 1) Pruebas de decremento de presión
- 2) Pruebas de incremento de presión
- 3) Pruebas de inyektividad - recuperación
- 4) Pruebas de ritmo de extracción variable

II. Pruebas en que se utilizan 2 o más pozos en forma simultánea

- a) Pruebas de interferencia

La información que puede obtenerse de las pruebas de presión es la siguiente:

- a) Capacidad de la formación (espesor X permeabilidad)
- b) Condiciones de producción del pozo (factor de daño)
- c) Presión promedio del yacimiento
- d) Porosidad
- e) Volumen poroso y permeable del yacimiento
- f) Presencia de heterogeneidades
- g) Condiciones de frontera del yacimiento

4. LISTA DE PARTICIPANTES

LISTA DE PARTICIPANTES

1. SECRETARIA PERMANENTE DE OLADE

Dr. Ulises Ramírez Olmos - Secretario Ejecutivo
Ing. Luiz Claudio Magalhaes - Director Técnico
Dr. Gustavo Cuéllar - Jefe del Programa Regional de Geotermia
Lic. Luis Zúniga - Jefe del Proyecto Regional de Geotermia
Ing. Eduardo Aguilera - Asesor del Programa Regional de Geotermia

2. MINISTROS DE ENERGIA

Ing. Alejandro Contreras Bonilla - Ministro de Energía y Minas
Guatemala
Ing. Emilio Rappaccioli - Ministro Director - Instituto Nicaraguense
de Energía - Nicaragua

3. CONFERENCISTA Y ASESORES

Prof. Franco Barberi - Universidad de Pisa - Italia - (Vulcanología)
Dr. Robert O. Fournier - U.S.G.S. - U.S.A (Geoquímica)
Prof. Paul Witherspoon - L.B.L. - U.S.A. (Hidrogeología)
Dr. Simon Spitz - C.C.G. - Francia - (Geofísica)
Dr. Patrick Muffler - U.S.G.S. - U.S.A. (Evaluación del Potencial)
Dr. Jesús Rivera - UNAM - México (Ingeniería de Reservorios)

4. REPRESENTANTES DE LOS PAISES LATINOAMERICANOS

Brasil

Sergio Medici de Estón
Asesor Ejecutivo
Agrupamento Mecánica Das Rochas
INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SAO PAULO
C.P. 7141 - CEP 05508
Sao Paulo

Bolivia

Oscar Ballivian Chávez
Director Ejecutivo
MINISTERIO DE MINERIA - GEOBOL
Federico Suazo, Esq, Reyes Ortíz
La Paz

Walter Cassis Zamora
Responsable Proyecto Geotérmico
MINISTERIO DE MINERIA Y METALURGIA
Av. 16 de julio 1769
La Paz

Zenón Delgadillo T.
Jefe División Geotérmica-ENDE
Av. Colombia esq. Falsuri N° 0-0655
Cochabamba

Hernán Rosales
Escargado Proyecto Geotérmico - CORDEPO
CORPORACION REGIONAL DESARROLLO DEL POTOSI
Omiste S/N
Potosi

Colombia

Martha Lucía Calvache
Geóloga, División de Geotermia
CENTRAL HIDROELECTRICA DE CALDAS - CHEC
Apartado aéreo 83
Estación Uribe,
Manizales

Luis Enrique Cruz Guevara
Geólogo
INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELECTRICA - ICEL
Cra. 7a. Avenida 26, esquina
Edificio Colseguros
Bogotá

María Luisa Monsalve
Geóloga
CENTRAL HIDROELECTRICA DE CALDAS - CHEC
Estación Uribe
Manizales

Bernardo Salazar
Proyecto Geotérmico Ruiz
CENTRAL HIDROELECTRICA DE CALDAS
Apartado aéreo 83
Manizales

Costa Rica

Teófilo de la Torre
Presidente Ejecutivo
INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
Sabana Norte
San José

Alfredo Mainieri Prote
Jefe Proyecto Geotérmico Miravalle
INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
Casilla aérea 3222
San José

Chile

Rafael Felipe Díaz Fulle
Geólogo Económico
SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINAS
Agustinas 785, 6º piso
Santiago

Ecuador

Marco Antonio Acosta Paredes
INSTITUTO NACIONAL DE ENERGIA
Italia 438
Quito

Eduardo Arturo Almeida Escobar
Jefe del Proyecto Geotérmico
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION - INECEL
12 de octubre y Madrid,
Edif, Torres Metropolitanas
Quito

Leonardo Efraín Astudillo Samaniego
Profesor
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
Escuela de Geología
Quito

Jorge Miguel Ayala Mosquera
Ingeniero Geólogo
INECEL
12 de octubre y Madrid
Quito

Alicia Ayala Granda
Ingeniera Geóloga
DIRECCION GENERAL DE GEOLOGIA Y MINAS
Jerónimo Carrión 1016 y Páez
Quito

Milton Balseca Granja
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
Quito

Ramiro Arturo Bermudez
Ingeniero Geólogo
MINISTERIO DE RECURSOS NATURALES Y ENERGETICOS
Carrión 1016 y Páez
Quito

Bernardo Beate
Geólogo
INECEL
12 de octubre y Madrid
Quito

Jorge Washington Calle
Subdirector, Departamento de Geología
ESCUELA POLITECNICA DEL LITORAL
Rocafuerte y Loja
Guayaquil

Héctor San Martín Delgado
Director Encargado
ESCUELA DE INGENIERIA EN GEOLOGIA
Universidad Central del Ecuador
Quito

Evelio Ferreiro Padin
Geólogo
Quito

Stalin Guerrero Carrión
Ingeniero Geólogo
HIGGECO LTDA.
Muros 258
Quito

Juan Gavino Guerrero
Programa Hidrocarburos
OLADE
Ave. Naciones Unidas y 10 de Agosto
Quito

Carlos Ramiro Iglesias Castillo
Especialista Geólogo
CENTRO DE LEVANTAMIENTOS INTEGRADOS DE
RECURSOS NATURALES POR SENSORES REMOTOS - CLIRSEN
Instituto Geográfico Militar
Quito

Carlos Marcelo Jaramillo Carrera
Superintendente de Proyectos
INECEL
Av. 12 de octubre y Madrid
Quito

Silvio Adriano Jaramillo Vinuesa
Ingeniero Geólogo
INECEL
Av. 12 de octubre y Madrid
Quito

Miguel Enrique Luna Alcívar
Profesor Geofísica
ESCUELA POLITECNICA DEL LITORAL
Guayaquil

Juan León Barreiro
Geólogo de la Sección Vulcanología
MINISTERIO DE RECURSOS NATURALES Y ENERGETICOS
Dirección General de Geología y Minas
Quito

Marco René Marín Carrera
Jefe Sección Hidrogeología
MINISTERIO DE RECURSOS NATURALES Y ENERGETICOS
Carrión 1016 y Páez
Quito

Iván Núñez Pérez
Jefe de la División de Geotécnica
INECEL
12 de octubre y Madrid

Patricio Romero
Coordinador, Asesor Geotermia
INE
Italia 438
Quito

Héctor Franklin Rosero Zambrano
COLEGIO DE GEOLOGOS
Universidad de Guayaquil
Guayaquil

Edgar Oswaldo Salazar
Jefe del Departamento de Geología
DIRECCION GENERAL DE GEOLOGIA Y MINAS
Páez 1016 y Carrión
Quito

Iván Sánchez
Profesor
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
Quito

Gastón Sandoval G.
Geoquímico del Proyecto Geotérmico
INECEL
12 de octubre y Madrid
Quito

Rodrigo Tirado
Profesor
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
Quito

Néstor Patricio Veloz Aguilera
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
Quito

El Salvador

Noel Espinosa Chavarría
Superintendente de Planificación y Estudios
COMISION EJECUTIVA HIDROELECTRICA DEL RIO LEMPA
9a. calle poniente N° 950
San Salvador

Samuel Oscar Ortíz
Geólogo
COMISION EJECUTIVA HIDROELECTRICA DEL RIO LEMPA
9a. calle Poniente N° 950
San Salvador

Alberto Vides Ramos
Asesor Geotérmico
COMISION EJECUTIVA HIDROELECTRICA DEL RIO LEMPA
9a. calle Poniente N° 950
San Salvador

Mauricio Retana
Director Técnico
SERVICIOS GEOLOGICOS S.A.
Colonia Sultana, Calle Los Claveles 21
San Salvador

Guatemala

Hugo Rolando Betancourth
Delegado Residente Estudios Geotérmicos
INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACION
Subestación Guatemala Sur
Guatemala

Carlos Tobar Jiménez
Geólogo
INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACION
Estudios geotérmicos, San José, Villa Nueva
Guatemala

Edgar Jesús Tobías Gutierrez
Supervisor General
INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACION
Guatemala Sur
Guatemala

Haití

Pierre-Ivon Beauboeuf
Responsable del Proyecto de Exploración Geotérmica
MINISTERIO DE MINAS Y RECURSOS ENERGETICOS
Delmas 19,
Port-au-Prince

Honduras

Mauricio Mossi Sorto
Director de Planificación y Control de Proyectos
EMPRESA NACIONAL DE ENERGIA ELECTRICA
Apartado Postal 99
Tegucigalpa

Wilmer Selin Flores
Encargado Proyecto Geotérmico
U. Geotécnica
EMPRESA NACIONAL DE ENERGIA ELECTRICA
Apartado Postal 99
Tegucigalpa

México

José Castro Mora
Jefe División Estudios Geológicos Especiales
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
Eje Central Lázaro Cárdenas 152
México

Sergio Mercado
Jefe Departamento de Geotermia
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS
Apartado 475,
Cuernavaca

Gabriel Moreno Pecero
Jefe de la División de Educación Continua
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
Tacuba 5, Centro C.P. 06000
México D.F.

Nicaragua

Roger Arcia Lacayo
Jefe de la Oficina de Producción
INSTITUTO NICARAGUENSE DE ENERGIA
Tica bus 2 c. al sur
Managua

Yadira Báez Padiila
INSTITUTO NICARAGUENSE DE ENERGIA
Pista de la Resistencia
Casilla 55
Managua

Claudia Chamorro Barrios
INSTITUTO NICARAGUENSE DE ENERGIA
Pista de la Resistencia
Managua

Ernesto Martínez Tiffer
Director General de Recursos Geotérmicos
INSTITUTO NICARAGUENSE DE ENERGIA
Ticabus 2 c. al sur
Managua

Alain Maixent Creusot
Vulcanólogo - Recursos Geotérmicos
INSTITUTO NICARAGUENSE DE ENERGIA
Managua

Panamá

Nicanor Ariel Madrid Villanueva
Geólogo
INSTITUTO DE RECURSOS HIDRAULICOS Y ELECTRIFICACION
Edificio Poli
Casilla 5285, Zona 5
Panamá

Arturo Ramírez
Jefe de Inv. Geológica
INSTITUTO DE RECURSOS HIDRAULICOS Y ELECTRIFICACION
Edificio Poli
Casilla 630 - El Dorado
Panamá

Vicente Euclides Ríos Rodríguez
Jefe del Departamento de Estudios
INSTITUTO DE RECURSOS HIDRAULICOS Y ELECTRIFICACION
Casilla 5 5285, Edificio Poli
Panamá

Perú

Ramiro Moro Sommo
Jefe de Servicios
ELECTROPERU S.A.
Av. de los Héroes Navales N° 144
Lima

República Dominicana

Fidel Calcagno Andujar
Encargado Proyecto Prefactibilidad Geotérmica Yayas-Constanza
DIRECCION GENERAL DE MINERIA
Calle Leopoldo Navarro, Esq. México
Edificio El Huache, 10 piso
Santo Domingo

Rafael Arturo Vásquez Mata
Primer Secretario
EMBAJADA DE REPUBLICA DOMINICANA EN ECUADOR
Diego de Almagro 2231
Quito

Venezuela

Virgilio Aníbal González Marcano
Jefe del Proyecto Geotérmico
MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS
Torre Oeste, Piso 17,
Parque Central
Caracas

Pablo Varela
Geólogo Asesor
Grupo de Coordinación y Ejecución Geotérmica
MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS
Parque Central, Torre Oeste, Piso 17
Caracas

5. REPRESENTANTES DE PAISES EXTRARREGIONALES

Estados Unidos

Marcelo Lippman
Investigador
LAWRENCE BERKELEY LABORATORY
Berkeley, Ca
California

John Whetten
Deputy Division Leader
LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY
Ms - D 446, Los Alamos, N.M.

Philip M. Wright
Associate Director
UNIVERSITY OF UTAH, RESEARCH INSTITUTE
420 Chipeta Way
Salt Lake City, Utah

Francia

Robert Fabriol
Geoquímico
B.R.G.M., DEPARTAMENTO DE GEOTERMIA
BP 6009 Orleans

Hubert Fabriol
Geofísico
BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES - BRGM
Av. de Concyr
45100 Orleans La Sourve

Gilles Le Tron
Ingeniero
BRGM
Orleans

Phillipe Masure
Representante de BRGM en los Países Andinos
Quito

Hugo Vialla
Asesor Técnico
BRGM
Humbolt 303 y San Ignacio
Quito

Italia

Tito Emilio Conforti
Gerente de Ventas
AQUATER - ENI
San Lorenzo in Campo

Andrea Merla
Gerente
GEOTERMICA ITALIANA
Via Maffi 5
Pisa

República Federal de Alemania

Oskar Kappelmeyer
Director
INST. FOR GEOSCIENCE
3 Hannover

REPRESENTANTES ORGANISMOS INTERNACIONALES

Leopoldo Báez Carrera
Representante en el Ecuador
CORPORACION ANDINA DE FOMENTO (CAF)
Av. 18 de septiembre 332, 4 piso
Quito

Marcelo Fernández
Director para Latinoamérica y el Caribe
FONDO ESPECIAL DE LA OPEP
P.O.Box 995
1011 Vienna
Austria

Eduardo Márquez
Especialista Sectorial de Energía
BID
Calle 50, Edificio Bank of America
Panamá
Panamá

Marco Sommi
Responsable Sectorial
MINISTERIO DE ASUNTOS EXTERIORES
Departamento de Cooperación al Desarrollo
Via Contarini 25, Roma, Italia

INTEGRANTES DE LOS GRUPOS DE TRABAJO Y PANELISTAS

Actualización de la metodología de las etapas de reconocimiento y prefactibilidad

- Prof. Franco Barberi - U. Pisa
- Dr. Robert O. Fournier - (USGS)
- Dr. Simon Spitz - CGG
- Dr. Paul Witherspoon (U. Berkeley, USA)
- Ing. Eduardo Aguilera - OLADE

Metodología de estimación del potencial

- Dr. Jesús Rivera (UNAM, México)
- Dr. Patrick Muffler - (USGS)
- Prof. Franco Barberi - U. Pisa

Capacitación

- Ing. Gabriel Moreno Pecero (UNAM, México)
- Dr. Jesús Rivera - (UNAM, Mexico)

Financiamiento de proyecto

- Econ. Marcelo Fernández (Fondo OPEP)
- Dr. Marco Sommi (Gobierno Italiano)
- Dr. Gustavo Cuéllar (OLADE)

Aspectos institucionales

- Ing. Marco Karolys - (INECEL, Ecuador)
- Econ. Mauricio Mossi - (ENEE, Honduras)
- Ing. Marcelo Jaramillo - (INECEL, Ecuador)