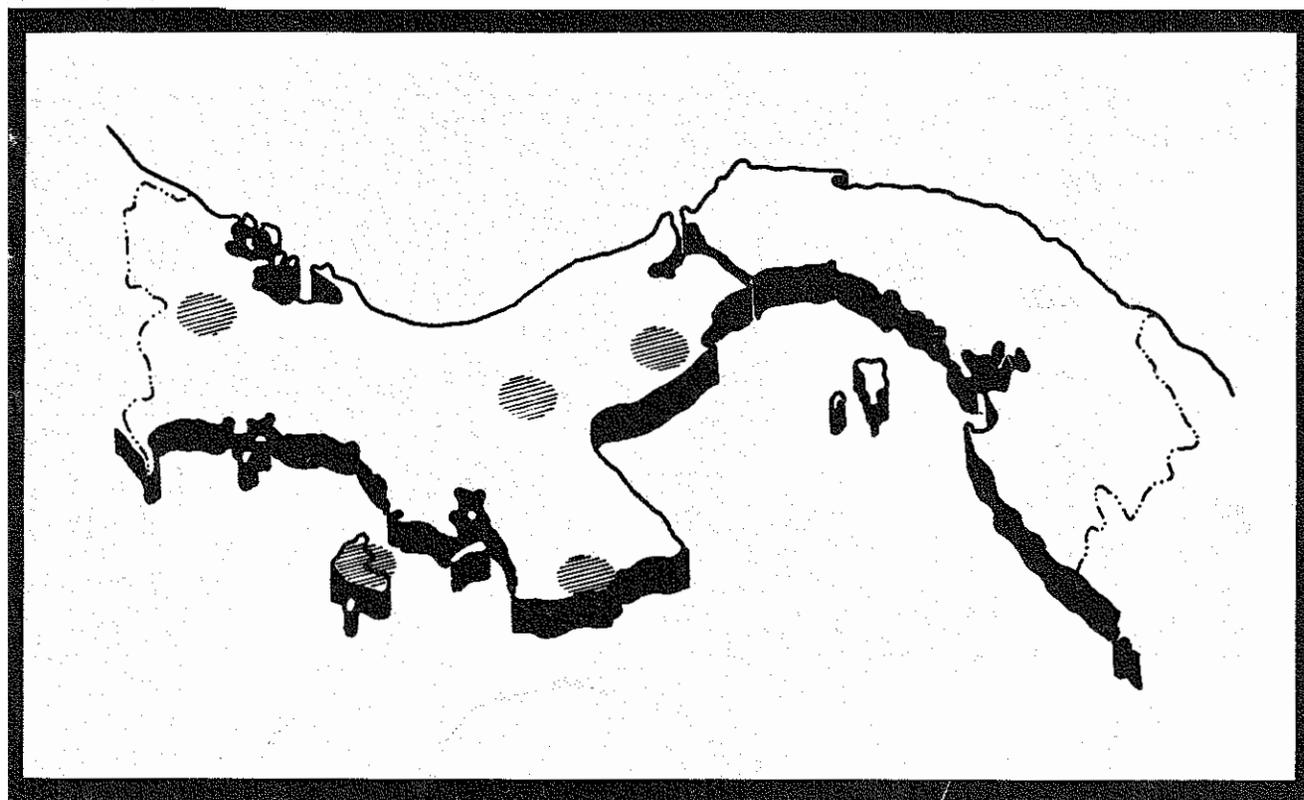


INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE RECONOCIMIENTO DE LOS RECURSOS GEOTERMICOS DE LA REPUBLICA DE PANAMA





INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE
RECONOCIMIENTO DE LOS RECURSOS
GEOTERMICOS DE LA REPUBLICA DE PANAMA

PROGRAMA IRHE-BID-OLADE

CONVENIO DE COOPERACION TECNICA IRHE-OLADE

Quito, julio de 1987

INDICE

| | Página |
|---|--------|
| RESUMEN EJECUTIVO | |
| 1. INTRODUCCION | 1 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 1.2 Antecedentes | 2 |
| 1.3 Organización del trabajo y personal | 3 |
| 1.4 Metodología | 4 |
| Metodología geovulcanológica | |
| Metodologías geoquímicas | |
| 2. DOCUMENTOS UTILIZADOS | 11 |
| 3. MARCO GEOLOGICO REGIONAL | 15 |
| 3.1 Elementos de tectónica de placas | 15 |
| 3.2 Litología y estratigrafía | 16 |
| 3.3 Marco tectónico | 18 |
| 4. SINTESIS DE LOS ESTUDIOS | 19 |
| 4.1 Isla de Coiba | 19 |
| Geovulcanología | |
| Geoquímica | |
| Evaluación geotérmica | |
| 4.2 Tonosí | 22 |
| Geovulcanología | |
| Geoquímica | |
| Evaluación geotérmica | |
| 4.3 Chitra-Calobre | 25 |
| Geovulcanología | |
| Geoquímica | |
| Modelo geotérmico preliminar de El Castillo | |
| 4.4 El Valle de Antón | 31 |
| Geovulcanología | |
| Hidrogeología | |
| Geoquímica | |
| Geofísica | |
| Evaluación geotérmica | |

| | | |
|-----|--|----|
| 4.5 | Barú-Colorado | 44 |
| | Introducción | |
| | Síntesis de los estudios | |
| | Implicaciones geotérmicas | |
| 5. | SELECCION DE LAS AREAS DE INTERES GEOTERMICO Y DEFINICION DE LAS PRIORIDADES | 63 |
| 6. | UN PROBABLE PROGRAMA PARA LA UTILIZACION DE LOS RECURSOS GEOTERMICOS DE BAJA Y MEDIA ENTALPIA EN EL AREA DE TONOSI | 65 |
| 6.1 | Objetivos de una fase exploratoria adicional | 65 |
| 6.2 | Organización y costos de una fase exploratoria adicional | 67 |
| 6.3 | Costos de desarrollo (pre-planta) | 68 |
| 6.4 | Posibles usos de los fluidos geotérmicos de baja entalpía en el área de Tonosí | 69 |
| | Generación de electricidad mediante unidades pequeñas | |
| | Usos directos en zootécnia y agroindustria | |
| 6.5 | Conclusiones | 72 |
| 7. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 75 |

ANEXOS

- No. 1- Mapa Geológico de Síntesis del Oeste de Panamá
- No. 2- Mapa Geológico Vulcanológico, Area Edificio de El Valle de Antón
- No. 3- Mapa Geológico Vulcanológico del Area Barú-Cerro Colorado
- No. 4- Complejo Barú-Colorado, Posible Trazado de las Curvas de Nivel de la Superficie del Basamento, Bajo los Materiales Volcánicos Posteriores
- No. 5- Complejo Barú-Colorado, Modelo de Circulación Hídrica
- No. 6- Complejo Barú-Colorado, Mapa Geoquímico de Síntesis

FIGURAS

- Fig 1- Características estructurales de América Central y zonas limítrofes.
- Fig 2- Mapa de ubicación.
- Fig 3- Modelo geotérmico preliminar de la zona de El Castillo (Chitra Calobre) basado sobre los datos geovulcanológicos y geoquímicos del estudio de reconocimiento.
- Fig 4- Las estructuras de La Mesa, El Valle y Mata Ahogado.
- Fig 5- Perfil morfológico esquemático N-S La Mesa, El Valle y relaciones estructurales entre las dos Calderas.
- Fig 6- Corte geológico del edificio El Valle de Antón.
- Fig 7- Ubicación de los pozos en el área de El Valle.
- Fig 8- Representación esquemática de la alimentación de los pozos artesianos en El Valle.
- Fig 9- Esquema del balance de agua en El Valle de Antón.
- Fig 10- Interpretación esquemática de la estructura profunda en El Valle de Antón según cortes N-S y O-E.
- Fig 11- Perfiles geoelectricos sugeridos para la zona "Pedregal" de Tonosí.
- Fig 12- Perfiles geoelectricos sugeridos para la zona "Agua Caliente - El Cortezo" de Tonosí.
- Fig 13- Costo de pozos exploratorios "on shore" en función de la profundidad.
- Fig 14- Costos específicos de pequeñas unidades eléctricas.
- Fig 15- Posible utilización de la energía geotérmica (ciclo producción de jugos).
- Fig 16- Posible utilización de la energía geotérmica (ciclo producción de cerveza).
- Fig 17- Posible utilización de la energía geotérmica (ciclo producción del papel).
- Fig 18- Posible utilización de la energía geotérmica (ciclo del curado del té).

RESUMEN EJECUTIVO

1. Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Panamá

El Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional, después de una evaluación crítica de las informaciones existentes, y de las condiciones geológicas, estructurales e hidrotermales basadas también en estudios fotogeológicos y de imágenes de satélite de toda la región occidental de Panamá, ha seleccionado inicialmente las siguientes áreas para la ejecución de estudios específicos orientados a la búsqueda de recursos geotérmicos de alta entalpía: Isla de Coiba, Tonosí, Chitira-Calobre y Valle de Antón. Estas áreas parecen presentar un interés geotérmico potencial a causa de la presencia de fenómenos volcánicos recientes y/o manifestaciones termales. Sobre estas cuatro áreas se ha ejecutado una primera campaña de estudios geovulcanológicos, geoquímicos e hidrogeológicos y los relativos estudios de laboratorio. Al final de esa primera fase, las áreas de Isla de Coiba y de Tonosí no se han revelado como de interés geotérmico, sobre todo por la falta de indicios relativos a la presencia de una anomalía térmica. Además, en estas zonas faltan fenómenos de actividad volcánica reciente y probablemente el gradiente geotérmico tiene un valor normal. Por la tanto no poseen perspectivas para recursos geotérmicos de alta entalpía, pero sí eventualmente, para recursos de media y baja entalpía. Por esta razón se elaboró un programa para la utilización de los recursos geotérmicos de baja y media entalpía en el área de Tonosí.

El área del Valle de Antón se ha revelado como la más prometedora de todo el país y su exploración se ha completado con estudios adicionales de geovulcanología y geoquímica y con la ejecución de investigaciones geofísicas (gravimétricas y geoelectricas). Estos estudios han permitido alcanzar un conocimiento del área a nivel de prefactibilidad, confirmando así su gran interés geotérmico. En particular parecen existir en esta área todos los requisitos de un sistema geotérmico de alta entalpía:

- a. Fuente de calor representada por la cámara magmática somera de "El Valle".
- b. Reservorio en rocas fracturadas del basamento correspondiente a un conjunto resistivo cuyo techo se encuentra a una profundidad económicamente accesible dentro de la caldera de El Valle (1.200-1.500 m).
- c. Cobertura impermeable muy espesa correspondiente probablemente a rocas alteradas por fenómenos hidrotermales.
- d. Indicios geoquímicos de subida de fluidos calientes profundos a lo largo de fracturas activas.

Todos estos datos han permitido elaborar un modelo geotérmico preliminar que tiene ahora que ser verificado mediante un pozo exploratorio de pequeño diámetro que servirá además para múltiples propósitos (control de litología, permeabilidad, muestreo de fluidos y medida del gradiente térmico). El área merece con seguridad la culminación de un estudio al nivel de Prefactibilidad.

La zona de Chitra-Calobre ha sido también confirmada como de interés geotérmico aunque con una prioridad inferior a la del Valle de Antón. Un complemento de los estudios geovulcanológicos ha permitido individualizar la zona del Cerro "El Castillo" como la más atractiva, desde el punto de vista geotérmico. Esta zona está caracterizada por:

- a. Un volcanismo cuaternario muy joven y químicamente evolucionado que podría haber creado una interesante anomalía térmica.
- b. Una actividad tectónica muy intensa que podría haber creado condiciones propicias para la existencia de reservorios geotérmicos en las rocas del basamento igneo terciario.
- c. Una prometedora concentración de fuentes termales alrededor del cerro "El Castillo". Resulta plenamente justificada, por lo tanto, la decisión de alcanzar el nivel de Prefactibilidad en los estudios geocientíficos, a través de la realización de investigaciones geoquímicas adicionales y de una campaña de exploración geofísica en la zona de "El Castillo".

2. Estudio del Complejo Barú-Colorado

Investigaciones realizadas en el complejo volcánico de Barú-Colorado hasta el año de 1983, proporcionaban favorables evidencias geológicas para la probable existencia de sistemas geotérmicos de alta entalpía. Estas evidencias se fundamentaban principalmente en la presencia de calderas de colapso en cada uno de los volcanes Barú y Colorado.

Con el objeto de definir el modelo geotérmico de la zona, se dio inicio en 1984 al Programa IRHE-BID-OLADE, para los estudios del Complejo Barú-Colorado. Se realizaron investigaciones geovulcanológicas, hidrogeológicas y geoquímicas.

Los resultados geovulcanológicos ahora obtenidos indican que las depresiones morfológicas con forma de herradura, previamente interpretadas como calderas de colapso en Barú y Colorado, en realidad representan estructuras producidas por complejos fenómenos tectónicos de deslizamiento en masa. Esto naturalmente resta importancia a los volcanes en el contexto de la exploración geotérmica, por cuanto fueron descartadas las características estructurales ideales, inferidas previamente.

El volcán Colorado, a causa de su edad relativamente antigua y de la probable gran profundidad de su sistema de alimentación, no parece aportar significativamente a la anomalía térmica regional que podría persistir en la parte profunda de la corteza bajo el volcán. La situación térmica del volcán Barú es diferente; en efecto, este volcán es mucho más joven y puede ser considerado todavía activo. Los productos han sido generados, según los datos petrológicos, en el interior de una cámara magmática somera de dimensiones notables que representaría una importante fuente de calor.

El cuadro hidrogeológico del complejo Barú-Colorado no se presenta muy favorable desde el punto de vista geotérmico por cuanto se tiene un basamento sustancialmente impermeable, el paquete lávico cuaternario no parece ser lo suficientemente potente como para alojar sistemas geotérmicos de alta entalpía y además falta una cobertura impermeable eficaz y extensa.

Los resultados de los estudios geoquímicos son también poco prometedores, las temperaturas geoquímicas son bajas y no se han identificado anomalías relacionadas con fuga de vapor. Únicamente la geoquímica de gases indica la probable existencia de un sistema hidrotermal profundo, que según la geología e hidrogeología no tendría una gran extensión vertical u horizontal.

Dentro de este contexto, la zona de Barú-Colorado se presenta como un prospecto de riesgo muy elevado para la exploración de recursos geotérmicos de alta entalpía, por lo que, habiéndose identificado en el estudio de Reconocimiento Nacional del Programa IRHE-BID-OLADE un área de mejores perspectivas como es Valle de Antón, la Junta Asesora del Programa recomendó suspender todas las actividades en Barú-Colorado y transferirlas al Valle de Antón. Esta decisión está enteramente justificada a la luz de los datos existentes.

1. INTRODUCCION

El programa IRHE-BID-OLADE, establecido en 1983, tenía como objetivo principal la realización de los siguientes estudios:

- a. Reconocimiento Geotérmico Nacional de la República de Panamá.
- b. Estudio del Complejo Barú-Colorado.

El programa del Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos tenía como objetivo final:

- a. Identificación de las áreas de potencial interés geotérmico de Panamá.
- b. Elaboración de esquemas geotérmicos preliminares en las áreas más interesantes.
- c. Definición de las prioridades en base a las condiciones geológicas e hidrogeológicas requeridas para la existencia de un campo geotérmico de alta entalpía.

El programa preveía la realización de las siguientes fases consecutivas de trabajo:

- a. Recolección y evaluación de la información básica disponible.
- b. Investigaciones geológicas, hidrogeológicas y geoquímicas de campo y de laboratorio.
- c. Interpretación geotérmica, definición de modelos geotérmicos preliminares y programación de una fase posterior de trabajos.

Los resultados de los trabajos de campo y de laboratorio, tanto del Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional como del contemporáneo Estudio del Complejo Barú-Colorado, determinaron algunos cambios radicales en las prioridades del Proyecto Geotérmico de Panamá, con las consiguientes modificaciones en la programación de los estudios. En efecto, los resultados de las investigaciones geológicas, geoquímicas e hidrogeológicas de campo y de laboratorio adelantaron algunas dudas en cuanto a la existencia de reservorios geotérmicos de alta entalpía, en el área de Barú-Colorado y este prospecto fue considerado como de un nivel de riesgo muy elevado desde el punto de vista de la exploración geotérmica.

Considerando que los resultados del Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional indicaban la existencia en el país de otras zonas más prometedoras ("El Valle de Antón" y subordinadamente, "Chitra Calobre") fueron decididos, conforme a lo recomendado por

la Junta Asesora en su segunda y tercera reunión (marzo 1985 y abril 1986), los siguientes cambios en el programa geotérmico de Panamá:

- a. Suspensión de todos los estudios adicionales en el área de Barú-Colorado.
- b. Realización, en las zonas más prometedoras de "El Valle de Antón" y "Chitra Calobre", de estudios adicionales de geovulcanología y de geoquímica con el objetivo de alcanzar, en ambas áreas, un grado de conocimiento al nivel de la prefactibilidad.
- c. Transferencia a las zonas más prometedoras identificadas en el Estudio de Reconocimiento, de los estudios geofísicos y perforaciones someras de diámetro reducido originalmente previstas para la fase sucesiva del Estudio de Prefactibilidad de Barú-Colorado.

El presente informe, sintetiza todos los resultados obtenidos en el curso del Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de la República de Panamá.

1.1 Objetivos

- a. El estudio se llevó a cabo con el objeto de efectuar una evaluación sistemática a nivel nacional de las posibilidades geotérmicas de la República de Panamá; identificar las áreas geotérmicas del país; seleccionar las áreas de interés prioritario y definir el esquema geotérmico de cada una de ellas.
- b. El objetivo final del estudio es incorporar el recurso geotérmico a la oferta energética nacional y permitir de esta manera y en forma complementaria con la hidroelectricidad, la sustitución del petróleo para los fines de generación eléctrica.
- c. Adicionalmente, con la realización del estudio se buscó adiestrar al personal nacional que participa en el mismo en técnicas de exploración geotérmica.

1.2 Antecedentes

Aparte de algunas informaciones geológicas contenidas en los trabajos geológicos del Proyecto Minero de las Naciones Unidas (ver referencia en el Informe 16), y el inventario de las fuentes termales de Panamá, realizado por IRHE en 1980, no existía ningún dato técnico utilizable, ni una previa investigación técnica de carácter sistemático. Antes del Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional que forma parte del programa IRHE-BID-OLADE, las

informaciones geovulcanológicas eran prácticamente inexistentes y limitadas a las pocas noticias contenidas en la cartografía geológica oficial. Todo interés geotérmico se había concentrado solo en el área de Barú-Colorado (Cerro Pando). Los únicos datos técnicos específicos relativos a otras zonas del país estaban contenidos en el informe de C.W. Klein "Geochemistry of Panamanian Thermal Waters. Results of a Reconnaissance Survey in 1980 by IRHE". En este informe se presentaban 27 nuevos análisis químicos de aguas y se consideraban 61 análisis ya conocidos, relativos a las Provincias de Cocle, Colón, Chiriquí, Herrera, Los Santos, Veraguas y a la Isla de Coiba.

Los datos de la Isla de Coiba y de Los Santos, estaban muy esparcidos y por lo tanto no eran significativos. Los datos geoquímicos relativos a la Provincia de Veraguas (manifestaciones termales de Calobre, Chitra, Barrero Grande, La Yeguada y La Flor) daban temperaturas de 100°C a 160°C, a ser consideradas con cautela, a causa de las diferencias de resultados proporcionados por los diferentes métodos geotermométricos. En conclusión, los únicos datos disponibles eran estos geoquímicos incompletos que, sin embargo, sirvieron para la selección preliminar de las zonas de interés potencial, a ser consideradas en el Estudio de Reconocimiento Nacional.

1.3 Organización del Trabajo y Personal

El trabajo de campo y de laboratorio fue realizado por un grupo de expertos contratados por OLADE, quienes trabajaron en estrecha cooperación con los técnicos del IRHE y bajo la supervisión de OLADE. El personal técnico involucrado en el estudio fue el siguiente:

| <u>Areas</u> | <u>Expertos OLADE</u> | <u>Técnicos IRHE</u> |
|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Geovulcanología | | |
| Fase inicial | Mauricio Retana Antonio Frullani | Ariel Madrid |
| Estudios adicionales | Antonio Frullani | Francisco Ponce |
| Petrología | | |
| Fase inicial | Fabrizio Innocenti | Eladio Almengor |
| Estudios adicionales | Valerio Arnó | Roberto Campo |
| Hidrogeología | | |
| | Alain Bargeas | Ovidio Fabrega Jaime Arrocha |

Geoquímica

| | |
|----------------------|------------------------------------|
| Fase inicial | Stefano Giaquinto Gioia Fanelli |
| Estudios adicionales | Luigi Marini Elizabeth Mayen |

La supervisión técnica de OLADE fue asegurada por Gustavo Cuelar, Eduardo Aguilera, Jorge Guiza y Eduardo Almeida. El Jefe del Proyecto, Ing. Arturo Ramirez, coordinó las actividades profesionales del personal del IRHE y aseguró el apoyo logístico a los trabajos.

Los trabajos analíticos fueron ejecutados, bajo contrato con IRHE, por los siguientes laboratorios:

- a. BRGM (Francia): análisis químicos de rocas.
- b. Zeta Analytica (Suiza): dataciones radiométricas K-Ar y ^{14}C
- c. IIE (México): análisis químicos de aguas.
- d. Geotérmica Italiana (Italia): análisis químicos de gases.
- e. Universidad de Pisa (Italia): análisis de microsonda y de composición isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

1.4 Metodología

La metodología utilizada es aquella recomendada por OLADE (Documento No. 1, 1978). Esta metodología se refiere de manera específica a la búsqueda de campos geotérmicos de alta entalpía en una región volcánica y se inspira en un modelo general de campo geotérmico que comprende los siguientes elementos esenciales:

- a. Una fuente de calor relativamente somera con una capacidad térmica suficiente como para calentar un volumen importante de rocas de la parte superficial de la corteza terrestre.
- b. Un reservorio constituido por rocas permeables en el que haya circulación de fluidos geotérmicos y situado a profundidades tales que su explotación sea rentable, debiendo existir por otra parte, un balance hídrico y estructura favorable para asegurar la recarga de agua en el reservorio.
- c. Una cobertura formada por una secuencia impermeable potente que impida la disipación del calor hacia la superficie y proteja al reservorio de una infiltración excesiva de aguas frías.

- Fuente de calor

La fuente de calor está comúnmente relacionada con una masa de magma a alta temperatura ubicada en el interior de la corteza terrestre (intrusiones en curso de enfriamiento o "cámaras magmáticas" de alimentación de un volcán).

La formación de cámaras magmáticas con suficiente capacidad térmica, que permita calentar un gran volumen de rocas encajantes, requiere condiciones tectónicas favorables, tales como el cruce de fallas o el basculamiento de bloques fallados que formen trampas tectónicas apropiadas y donde el magma en ascenso repose, favoreciendo su diferenciación.

Por lo tanto, deben investigarse las relaciones entre estructuras volcánicas y lineamientos tectónicos con el fin de reconocer la ocurrencia a poca profundidad, de cuerpos magmáticos calientes.

Elementos favorables son: la gran persistencia de actividad volcánica a través del tiempo y las frecuentes erupciones de productos fuertemente diferenciados, los cuales requieren para su formación de un largo período de permanencia del magma en la cámara. En la mayoría de los casos, las cámaras magmáticas son reservorios que alimentan grandes volcanes centrales, es decir estructuras volcánicas formadas alrededor de una chimenea central, mediante varias erupciones de productos de diferente composición, genéticamente, conectados a través de cristalización fraccionada.

- Reservorio

El reservorio está formado por rocas de alta permeabilidad, con un volumen suficiente para asegurar una explotación importante y prolongada en el tiempo. Su situación hidrogeológica debe permitir una recarga adecuada que compense las pérdidas sufridas por explotación, haciendo que el yacimiento geotérmico tenga el carácter de renovable.

La delimitación del reservorio debe hacerse en base a un conocimiento detallado del marco geológico regional, ya que normalmente, las formaciones geológicas que pueden constituir el reservorio se encuentran enmascaradas por recubrimientos volcánicos y de ahí la necesidad de estudiarlas donde afloran, a veces a distancias considerables del área de interés geotérmico.

Un método muy útil para obtener información del posible reservorio es el estudio de los xenolitos incluidos en los productos volcánicos explosivos, que son fragmentos arrancados del conducto eruptivo realizándose así un muestreo natural de los horizontes geológicos subsuperficiales. Su estudio petrográfico puede suministrar evidencias de alteraciones hidrotermales producidas por la circulación de fluidos geotérmicos.

Dado que muchos campos geotérmicos tienen el reservorio en rocas con permeabilidad secundaria (por fracturación) es importante

identificar las áreas de mayor fisuración y su distribución espacial relacionada con los accidentes tectónicos de la región.

Finalmente, la delimitación del reservorio, que es uno de los problemas que más dificultades plantea en un estudio geotérmico, debe ser afrontada y discutida por los diferentes especialistas (geoquímicos, hidrogeólogos, vulcanólogos y geofísicos) quienes deberán elaborar el más apropiado programa de exploración geofísica.

- Cobertura

Es necesaria la presencia de una secuencia impermeable que cubra el reservorio con doble propósito: protegiéndolo de la infiltración de aguas meteóricas frías e impidiendo la disipación de la energía en él contenida.

La roca de cobertura puede ser impermeable por sí misma, por ejemplo una secuencia arcillosa, o bien roca autosellada por alteración hidrotermal. Para identificarla se debe conocer la naturaleza litológica de los horizontes subsuperficiales, así como su sucesión estratigráfica.

1.4.1 Metodología geovulcanológica

Conforme con la metodología OLADE, los siguientes estudios han sido realizados en todas las áreas de volcanismo reciente de Panamá:

- a. Estudio fotogeológico, con particular atención a las relaciones entre actividad volcánica, tectónica regional y local, y manifestaciones termales.
- b. Investigaciones de campo: control de la fotointerpretación, muestreo para estudios petrológicos y químicos de las rocas volcánicas y de los xenolitos hidrotermalizados.
- c. Estudios de laboratorio: petrografía de las rocas, dataciones radiométricas de muestras seleccionadas; análisis químicos de muestras representativas de los diferentes tipos de volcanitas aflorantes en el área; cálculos petroquímicos (normas, índice de diferenciación, etc.) y diagramas petroquímicos; evaluación genética e implicaciones geotérmicas.

En el caso de áreas termales no relacionadas directamente con fuentes de calor magmáticas someras, la probabilidad de encontrar un campo geotérmico de alta entalpía depende de la existencia de condiciones estructurales e hidrogeológicas favorables.

En este caso, las aguas termales o los gases pueden subir de acuíferos situados a gran profundidad, a lo largo de fallas tensionales. Por lo tanto se puso particular atención a la fotointerpretación y a la identificación en el campo de las

relaciones entre las manifestaciones termales (activas y fósiles) y las estructuras tectónicas. Esta clase de información junto con el estudio hidrogeoquímico, debería permitir identificar los circuitos hidrogeológicos profundos y evaluar la probabilidad de encontrar un campo geotérmico económico.

En la fase de campo ha sido evaluada con particular atención la presencia de rocas permeables de volumen bastante grande para representar un reservorio geotérmico y la presencia de rocas impermeables apropiadas por sus características hidrogeológicas para ser una buena capa sello. La permeabilidad de las varias formaciones aflorantes ha sido atentamente controlada, así como su posible modificación causada por movimientos tectónicos o por la alteración superficial, que en esta región es muy intensa. También los procesos de autosellamiento han sido evaluados.

En particular ha sido estudiada la tectónica que afecta las formaciones más recientes (neotectónica) a fin de identificar las fracturas y fallas más importantes que puedan ser las zonas de mayor permeabilidad vertical en la actualidad.

Un esfuerzo particular ha sido enfocado en el estudio de los productos piroclásticos hidromagmáticos, originados por la interacción explosiva agua-magma. El estudio de los xenolitos contenidos en estos depósitos, puede proveer evidencias sobre la presencia de acuíferos profundos y su temperatura, según un nuevo criterio exploratorio vulcanológico que ya se ha demostrado es muy valioso. Estas nuevas técnicas fueron expuestas en el Seminario sobre Exploración Geotérmica, realizado por OLADE en Quito-Ecuador, 1983 (1).

1.4.2 Metodologías geoquímicas

Las técnicas hidrogeoquímicas y la geoquímica de los gases han sido desarrolladas de acuerdo con la metodología de OLADE. Sin embargo, se incluyen algunos comentarios específicos para este Proyecto. Las técnicas hidrogeoquímicas de exploración geotérmica tienen como objetivo la identificación de reservorios localizados en profundidad y la evaluación de algunas de sus características; el material de estudio para lograr estos fines son las muestras de agua que se pueden recolectar en la superficie.

En general se han desarrollado hasta hoy dos distintas metodologías hidrogeoquímicas, una es específica para la búsqueda del vapor geotérmico, y la otra para la de los líquidos geotérmicos.

La primera estudia la distribución de los "indicadores de fuga" o "trazadores del vapor geotérmico" (amoníaco, ácido bórico) en

(1) "Seminario Latinoamericano de Exploración Geotérmica", Quito-Ecuador, septiembre 1983. Ver en las memorias el artículo "Geovulcanología en la Exploración Geotérmica" por Franco Bárberi.

las aguas freáticas (y/o de circuitos someros) a fin de detectar escapes de vapor provenientes de sistemas geotérmicos profundos; la presencia de estos sistemas y de sus características pueden ser inferidos por inducción.

La otra estudia los líquidos geotérmicos que llegan hasta la superficie en situaciones hidrogeológicas particulares proporcionando así informaciones respecto a la temperatura existente en profundidad, por lo menos entre los límites de la hipótesis de equilibrio entre rocas y soluciones hidrotermales.

La primera metodología es un verdadero método de exploración minera e investiga toda el área, mientras que la segunda provee informaciones más precisas pero limitadas a ciertos puntos de agua privilegiados.

Ninguna de las dos metodologías utilizadas por separado es una panacea, por lo tanto estas tienen que ser aplicadas en conjunto, de manera que se consiga el máximo de información y se incremente su eficacia.

Ambas metodologías necesitan un muestreo cuidadoso y completo de manantiales termales, fuentes frías, pozos, ríos y un estudio clasificativo preparatorio, dirigido a la identificación de los circuitos hidrogeológicos de las áreas investigadas; en otras palabras, las aguas freáticas y las aguas pertenecientes a los circuitos someros son distintas de las aguas procedentes de acuíferos profundos. Las mezclas pueden ser identificadas basándose en las características físicas, químicas e isotópicas. Este estudio clasificativo es esencial para una correcta utilización, sea de la geotermometría química como de la geoquímica de los indicadores de fuga.

En efecto, las técnicas geotermométricas se pueden aplicar solamente a muestras representativas del equilibrio entre agua y rocas presentes en profundidad, suponiendo la existencia de esta condición, obviamente. Por lo tanto estas muestras tienen que ser seleccionadas apropiadamente; los posibles procesos de mezcla entre aguas freáticas y fluidos geotérmicos (que enmascaran sus caracteres originales) tienen que ser reconocidos y evaluados, así como otros fenómenos tales como ebullición y precipitación de fases sólidas.

La distribución de los indicadores de fuga puede ser estudiada mejor, solamente si los caracteres químicos fundamentales vienen considerados por medio de apropiados procesamientos de datos.

Este trabajo hidrogeoquímico tiene que ser integrado con la geoquímica de los gases a manera de tener una visión completa de la circulación de los fluidos relacionada con los sistemas geotérmicos investigados.

En el campo se han descrito las características hidrogeológicas de los manantiales termales (o de interés particular en el con-

texto hidrogeológico de la región) y han sido efectuadas las siguientes determinaciones:

| <u>Parámetro</u> | <u>Método</u> | <u>Sensibilidad</u> |
|------------------|-----------------|---------------------------------|
| Temperatura | Sensor Pt 100 | 0,1 °C |
| pH | pHímetro | 0,01 unidades pH |
| Conductividad | Conductivímetro | 0,1 % F.S. |
| HC03 (+CO3) | Acidimetría | 10 ppm como CaCO3 |
| SiO2 | Colorimetría | 10 ppm como SiO2 |
| NH3 | Potenciometría | (5 x 10 ⁻⁷) moles/l |
| Caudal | Visual | |

Temperatura, pH, conductividad eléctrica, HC03+(CO3) y sílice han sido determinados directamente en el punto de muestreo. La determinación de amoníaco ha sido realizada mediante electrodo ión-específico, dentro de las primeras 24 horas, en un laboratorio instalado en la zona de operaciones. Además se tomaron muestras de gases para la aplicación de las técnicas de geotermometría en fase gaseosa.

2. DOCUMENTOS UTILIZADOS

El presente informe está basado sobre la información técnica contenida en los documentos que se enlistan a continuación, y cuyos originales fueron entregados oportunamente por OLADE al IRHE:

- 1) OLADE (1981) Aprovechamiento de los recursos geotérmicos de la República de Panamá, Occidente de Chiriquí-Fase 1. (e informes citados de estudios previos).
- 2) IRHE (1983) Informe de la Primera Reunión de la Junta Asesora.
- 3) IRHE - OLADE (1985) Prefactibilidad Avanzada de Complejo Barú-Colorado, Informe Geovulcanológico Preliminar
- 4) IRHE - OLADE (1985) Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional - Informe Geovulcanológico Preliminar.
- 5) IRHE - OLADE (1985) Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional. Geoquímica. Informe Preliminar sobre las Actividades Desarrolladas en el Campo.
- 6) IRHE - OLADE (1985) Prefactibilidad Avanzada del Estudio del Complejo Barú-Colorado, Geoquímica, Informe Preliminar sobre las actividades desarrolladas en el campo.
- 7) IRHE (1985) Informe de la Segunda Reunión de la Junta Asesora.
- 8) IRHE - OLADE (1985) Primer Informe del Coordinador Científico para los Estudios de Reconocimiento Geotérmico Nacional y Prefactibilidad Avanzada del Complejo Barú-Colorado: Revisión de los trabajos.
- 9) IRHE - OLADE (1985) Estudio Hidrogeológico del área del Valle de Antón.
- 10) IRHE - OLADE (1985) Informe Hidrogeológico del Complejo Barú-Colorado.
- 11) IRHE - BRGM (1985) Análisis químicos y cálculos normativos y petroquímicos de las Rocas Volcánicas de Panamá.

- 12) IRHE - Zeta
Analytica (1985) K-Ar Dating Analysis of Rock Samples
- 13) IRHE - OLADE (1985) Estudios de Reconocimiento Geotérmico Nacional y Prefactibilidad Avanzada del Complejo Barú-Colorado: Informe sobre la calidad de los datos analíticos de agua.
- 14) IRHE - OLADE (1985) Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional. Informe Petrográfico.
- 15) IRHE - OLADE (1985) Petrografía de la Región Barú-Colorado.
- 16) IRHE - OLADE (1985) Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional. Informe Geovulcanológico.
- a) Estudio Regional. Area del Valle de Antón. Area de Tonosí.
b) Area Isla de Coiba
c) Area Chitra Calobre. Con mapas geológicos a escala 1:100 000 y perfiles.
- 17) IRHE - OLADE (1985) Prefactibilidad Avanzada del Estudio del Complejo Barú-Colorado: Informe Geovulcanológico con mapa geológico, escala 1:50 000 y perfiles.
- 18) IRHE - OLADE (1986) Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional. Informe Geoquímico.
- 19) IRHE - OLADE (1986) Estudio del Complejo Barú-Colorado: Informe Geoquímico.
- 20) IRHE - OLADE (1986) Estudios petrológicos adicionales de algunas vulcanitas del sistema Barú y Valle de Antón.
- 21) IRHE - OLADE (1986) Estudios petrológicos adicionales: determinación de la composición isotópica ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) de muestras de rocas seleccionadas de los volcanes El Valle de Antón y Barú.
- 22) IRHE - OLADE (1986) National Geothermal Reconnaissance and Advanced Prefeasibility of Baru-Colorado complex: Advancement of the studies (by the Scientific Coordinator).
- 23) IRHE (1986) Informe de la Tercera Reunión de la Junta Asesora.
- 24) IRHE - Zeta
Analytica (1986) Radiocarbon Dating Analysis

- 25) IRHE - IIE (1986) Muestreo y análisis de aguas naturales de las zonas de Barú-Colorado y El Valle. Informe parcial: resultados de los análisis químicos.
- 26) IRHE - IIE (1986) Interpretación de datos geoquímicos de la zona termal localizada en la Provincia de Chiriquí.
- 27) IRHE - OLADE (1986) Prefactibilidad Avanzada del Estudio del Complejo Barú-Colorado: Interpretación de los datos geoquímicos adicionales y conclusiones finales.
- 28) IRHE - OLADE (1986) Estudio hidrogeológico Area de Valle de Antón. Informaciones sobre los pozos existentes.
- 29) IRHE - OLADE (1987) Area del Valle de Antón. Estudio petrográfico de algunas muestras de depósitos piroclásticos y datación ¹⁴C de una muestra de carbón en la secuencia piroclástica de Río Mar.
- 30) IRHE - OLADE (1987) Area Chitra-Calobre. Estudio Petrológico.
- 31) IRHE - OLADE (1987) Area del Valle de Antón. Estudio Geovulcanológico de Prefactibilidad.
- 32) IRHE - OLADE (1987) Area Chitra-Calobre. Estudio Geovulcanológico de Prefactibilidad.
- 33) IRHE- GEOSYSTEM (1987) Investigaciones Geofísicas en el Estudio de Prefactibilidad en el Area de El Valle de Antón; I Informe Final, II Geoeléctrica, III Gravimetría.
- 34) IRHE - OLADE (1987) Evaluación y Síntesis de los Resultados Geofísicos del Area de El Valle de Antón.
- 35) IRHE - OLADE (1987) Advancement of the studies (report by the Scientific Coordinator)
- 36) IRHE (1987) Informe de la Cuarta Reunión de la Junta Asesora.
- 37) IRHE - OLADE (1987) Area del Valle de Antón. Informe Geoquímico de Prefactibilidad.

3. MARCO GEOLOGICO REGIONAL

3.1 Elementos de Tectónica de Placas

La República de Panamá está constituida por una estrecha faja territorial que se alarga de este a oeste en forma sinuosa y con la cual termina el Istmo Centroamericano. Está marcada en todo su largo por una cordillera que divide el país en dos vertientes bien definidas: la vertiente del Caribe al norte y la del Pacífico al sur. Esta cordillera forma parte de la cadena volcánica de Centro América la cual se desarrolla paralelamente a la línea litoral. Esta unidad pertenece al sistema montañoso circumpacífico y tuvo origen en el ciclo orogénico Alpino (Eras Secundaria y Terciaria).

La estructura geológica de Panamá es el resultado de la interacción de tres placas litosféricas: Cocos, Nazca y Caribe. Generalmente se considera Panamá como parte integrante del borde sur-occidental de la placa Caribe. Hacia el sur, en el área conocida como el "Panamá Basin" (Cuenca de Panamá), se encuentran las otras dos placas: la "Cocos" al oeste de la longitud de 83 grados y la "Nazca" al este. El "punto triple", es decir donde las tres placas están en contacto, está ubicado en las cercanías de Punta Burica (Chiriquí). El límite entre las placas Cocos y Nazca, a lo largo del antedicho meridiano, lo constituye la denominada "Panamá Fracture Zone" (Zona de Fractura Panamá) indicada en la figura No. 1.

La parte oeste de la "Cuenca de Panamá" (Placa Cocos) ha sido originada por una expansión, aproximadamente norte-sur, desde el límite entre las Placas Cocos y Nazca. Dicho límite se expande actualmente en varios segmentos limitados por grandes fallas transformacionales. El centro de expansión es conocido como el "Galapagos Rift" (Dorsal Galápagos). La corteza oceánica neoformada al norte de la Dorsal Galápagos subduce bajo el territorio de la América Central (comprendiendo el occidente de Chiriquí). Esta subducción produjo la Fosa Centro Americana y es la fuente de la actividad sísmica y del volcanismo de naturaleza calco alcalina existente en el área.

Al este de la "Zona de Fractura Panamá", la "Cuenca de Panamá" está constituida por la placa Nazca y sus relaciones con la Placa Caribe, es decir la situación estructural de la parte central del país que incluye las áreas del Valle de Antón y de Chitira Calobre que nos interesan directamente, no están bien definidas.

Según la mayoría de los autores la subducción de la Placa Nazca bajo la Caribe terminó hace varios millones de años (Mioceno medio a superior) y el límite entre las dos placas no presentaría ninguna de las características peculiares de las zonas en subducción. En efecto:

- a. La batimetría del fondo del Pacífico cerca de la costa de Panamá no presenta una morfología de fosa.
- b. Hay muy pocos epicentros sísmicos en esta faja, siendo la sismicidad concentrada en la "Panamá Fracture Zone".
- c. El volcanismo calco alcalino al este del volcán Barú se habría extinguido desde el Mioceno.

En base a estas suposiciones se consideraba que el límite entre las Placas Nazca y Caribe era más bien caracterizado por movimientos sinistral de transcurrancia, antes que por subducción.

El estudio de Reconocimiento, por el contrario, ha evidenciado que la actividad volcánica ha continuado en Panamá hasta períodos muy recientes también al este de Chiriquí (ej. El Valle de Antón y El Castillo) y que este volcanismo tiene afinidad típicamente calco alcalina, es decir característica de zonas de subducción de placas.

La explicación de esta aparente contradicción radica probablemente en el hecho que la convergencia entre las dos placas está prácticamente terminada, aspecto evidenciado por la falta de una fosa, de sismicidad y la ocurrencia de corteza oceánica pegada a rocas continentales en el sur de la península de Azuero. No obstante, el proceso de subducción aún paulatino, o mejor dicho, en fase de extinción, debe haber continuado hasta el Pleistoceno superior produciendo volcanismo calco alcalino a veces muy intenso como en el volcán de El Valle de Antón.

3.2 Litología y Estratigrafía

Con objeto de simplificar la terminología, en el Estudio de Reconocimiento se ha denominado "basamento" a todos aquellos materiales intrusivos, volcánicos y sedimentarios sobre los que se apoyan los productos de emisión del vulcanismo cuaternario o Plio-Cuaternario. El "basamento" abarca todas las rocas formadas a lo largo de un período de tiempo muy largo (todo el Terciario y parte del Mesozoico) y por procesos genéticos muy diversos (intrusivos, volcánicos y sedimentarios). Por ello, aunque los sedimentos marinos están muy bien estudiados en todo el país, faltan investigaciones de conjunto que aborden la evolución espacio-temporal del vulcanismo terciario y de las rocas intrusivas asociadas, correlacionándolas con la sedimentación que simultáneamente tenía lugar en el mar.

Las rocas más antiguas conocidas en la República de Panamá, afloran en las áreas elevadas de la región sur occidental de la Península de Azuero y en la Península de Soná. Por sus características generales estas rocas son asimilables al complejo Nicoya de Costa Rica. Se trata de volcanitas básicas y rocas ultrabásicas: lavas basálticas, picritas, gabros, diabasas, peridotitas.

Las lavas presentan frecuentemente estructuras en "almohadilla", indicativas de un emplazamiento en ambiente submarino.

Característica sobresaliente de esta formación es la fuerte deformación a menudo asociada con un ligero metamorfismo en las facies esquistos verdes. Asociadas con estas rocas se encuentran también formaciones vulcanosedimentarias como conglomerados, pelitas, calizas silíceas y "cherts". Su edad es precretácica no bien definida. Las rocas sedimentarias comprenden calizas de edad Cretácica (Provincia de Bocas del Toro, Soná y Azuero), localmente afectadas por metamorfismo de contacto y depósitos detríticos terciarios (siltitas, areniscas, arcillas con pocas calizas o margas de edad Eoceno y Mioceno) alternantes, derivantes o asociados a productos volcánicos.

La mayor parte de las rocas intrusivas se concentran localmente en franjas orientadas en dirección NO-SE que coinciden con la zona axial de la Cordillera Central. Las intrusiones comprenden una amplia gama litológica (gabros, dioritas, granodioritas) y forman cuerpos muy numerosos de dimensiones generalmente limitadas; los diques son también muy frecuentes. Las intrusiones parecen haberse sucedido a lo largo del tiempo, desde el Eoceno hacia el Plioceno, tal vez con una concentración en el Mioceno.

La mayor parte del basamento es el resultado de una actividad volcánica que, tal vez desde finales del Mesozoico, se sucedió hasta el Mioceno Superior, con períodos de tranquilidad que quedan reflejados en discordancias intraformacionales. La actividad estuvo concentrada a lo largo del tiempo en el eje de cumbres que actualmente constituye la divisoria de aguas del país (Cordillera Central), y desde esta franja orientada en dirección NO-SE se derramaron hacia ambos lados, rocas volcánicas calco alcalinas que, con gran frecuencia, tuvieron carácter fragmentario y génesis explosiva que permitieron una gran dispersión areal de los productos, cuya deposición en los mares próximos (Caribe y Pacífico) dio lugar a sedimentos detríticos que constituyen prolongaciones laterales de las rocas volcánicas subaéreas.

El período comprendido entre el Mioceno Superior y el Plioceno Inferior parece caracterizado por una suspensión de la actividad volcánica y la excavación de una superficie de erosión muy acentuada. Un nuevo período de actividades volcánicas se inició en el Plioceno superior. Este período continúa en el presente en la zona de Barú y ha sido activo hasta una época muy reciente en ambas zonas seleccionadas como las más prometedoras en el Estudio de Reconocimiento (El Valle de Antón y Chitira-Calobre). La larga pausa de inactividad volcánica, con duración correspondiente a casi todo el Plioceno, debe tener una importante significación tectónica, como será discutido en el siguiente párrafo.

3.3 Marco Tectónico

Durante el Mioceno y Plioceno Inferior, un probable aumento de la velocidad de convergencia de las placas Cocos y Caribe ocasionó una disminución en el ángulo de incidencia de la superficie de Benioff y, contemporáneamente, cesó la distensión que permitía el vulcanismo. Este período compresivo generó deformaciones tectónicas (plegamiento ligero, fallamiento inverso, basculamiento) que afectaron sobre todo a los sectores más próximos al mar, pero la consecuencia más importante del cese de la actividad volcánica fue de carácter erosivo, se produjo un desmantelamiento de la cadena volcánica (situada a mayor altura), que sacó a la luz los niveles profundos ocupados por las intrusiones asociadas al vulcanismo. La abrupta superficie de erosión así creada, permite observar en la actualidad la constitución interna de la antigua cadena volcánica y su simetría con respecto al eje de emisión: un núcleo axial de rocas subvolcánicas que intruyen a volcanitas subaéreas produciendo en ellas intensas transformaciones hidrotermales (alteración y mineralización) y, cerca del mar, imbricación e interdigitación entre las volcanitas y los sedimentos marinos derivados de ellas.

Un nuevo cambio en el régimen de subducción restableció en el Plioceno Superior, las condiciones tectónicas distensivas y, de esta forma, se inició un nuevo período de actividad volcánica que continúa en el presente o hasta época muy reciente. Este vulcanismo es general en Centroamérica y está relacionado con la existencia de un graben longitudinal, muy marcado en países como El Salvador o Nicaragua. El occidente de Chiriquí parece corresponder a la terminación oriental del graben centroamericano. En la restante parte de la Cordillera Central de Panamá, esta estructura no es evidente. Sin embargo, la tectónica distensiva cuaternaria es muy evidente en las áreas afectadas por vulcanismo reciente, como está indicado sobre todo por la red de drenaje bien jerarquizada que afecta el basamento. Detalles sobre las principales direcciones neotectónicas serán proporcionados en la descripción de las diferentes áreas.

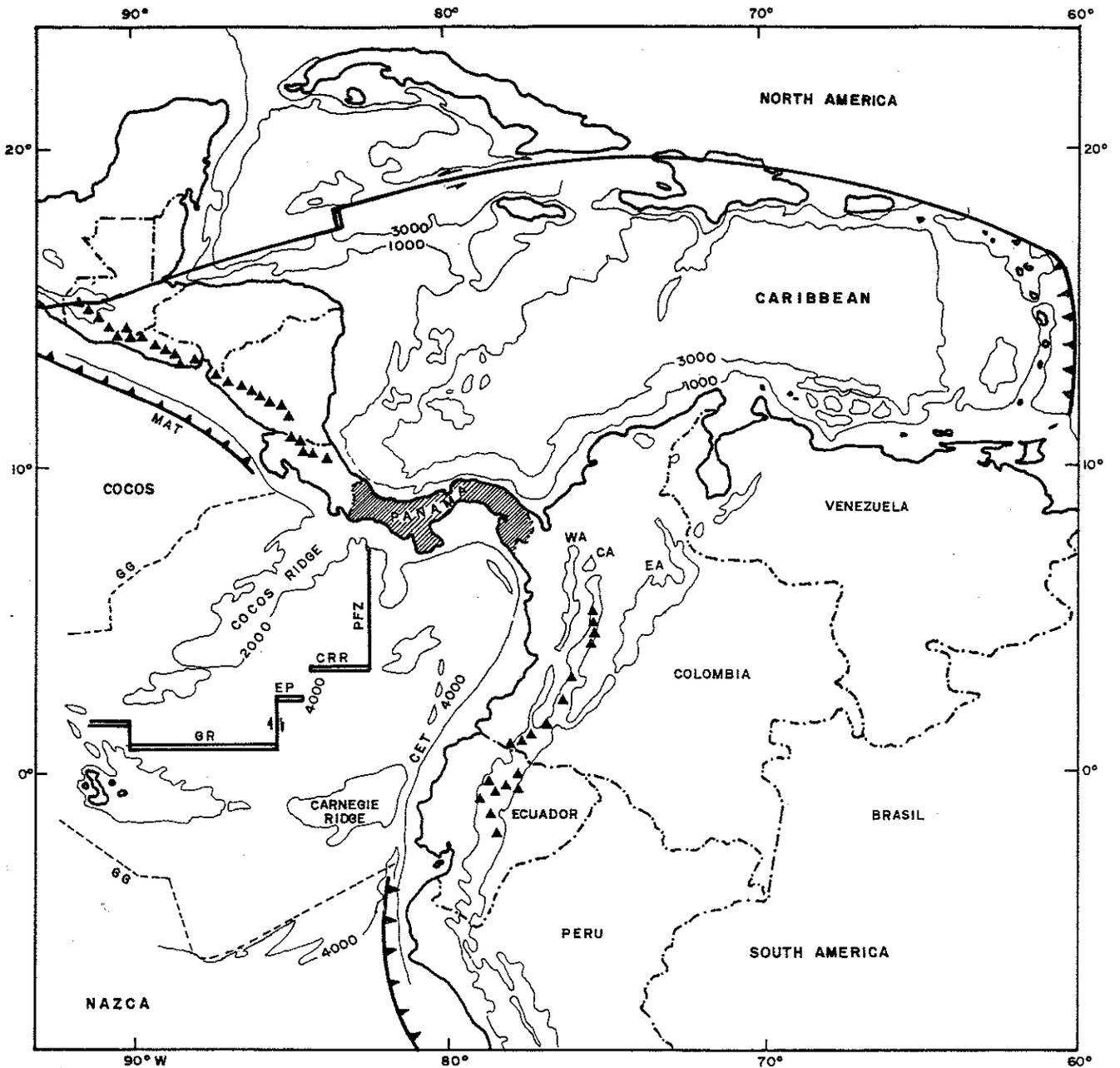


Fig. 1 - (DE PENNINGTON, 1981)

CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES DE AMERICA CENTRAL Y ZONAS LIMITROFES.
 WA, ANDES OCCIDENTALES; CA, ANDES CENTRALES; EA, ANDES ORIENTALES;
 PFZ, PANAMA FRACTURE ZONE; CRR, COSTA RICA RIFT; ER, ECUADOR RIFT;
 GR, GALAPAGOS RIFT; GG, GALAPAGOS GORE; CET, COLOMBIA ECUADOR TRENCH;
 MAT, MIDDLE AMERICAN TRENCH.

4. SINTESIS DE LOS RESULTADOS

Desde la fase inicial del Estudio de Reconocimiento, la atención fue concentrada sobre las siguientes áreas (Figura No. 2):

- a. El Valle de Antón
- b. Chitra-Calobre
- c. Tonosí
- d. Isla de Coiba

Estas áreas habían sido consideradas de interés geotérmico potencial en base a la presencia de fenómenos de vulcanismo de edad reciente y/o a la presencia de manifestaciones termales identificadas y estudiadas en forma preliminar en el inventario del IRHE (1980).

Siguiendo una específica recomendación de la Junta Asesora (segunda reunión, marzo 1985) el estudio de fotogeología y de imágenes de satélite fue extendido a cubrir toda la región occidental de Panamá. Sin embargo, ninguna otra zona potencialmente interesante fue identificada y el Estudio de Reconocimiento quedó concentrado sobre las cuatro áreas arriba mencionadas, además de una descripción general geológica y estructural del país (ver Informe No. 16-a). A continuación se presenta la síntesis de los resultados obtenidos a través de todas las investigaciones realizadas.

4.1 Isla de Coiba

4.1.1 Geovulcanología

La Isla de Coiba se localiza en el Océano Pacífico, al sur de la Península de Soná, a unos 16 km de distancia de la línea litoral. Las rocas que conforman la isla consisten principalmente en lavas basálticas submarinas y suprayacentes sedimentos clásticos, ambas de edad Eocénica (Anexo No. 1). Las lavas básicas se apoyan sobre rocas cretácicas carbonatadas cuyo espesor no excede las decenas de metros. Se trata de las rocas más antiguas aflorantes en la isla y que pertenecen a la formación Ocú, bien conocida en las cercanas penínsulas de Soná y de Azuero.

Las rocas volcánicas terciarias (Eoceno) incluyen basaltos submarinos con estructura de almohadilla, diques y sills diabásicos. Las características petrográficas indican una probable derivación de estas lavas a partir de una corteza oceánica. En efecto, la Isla de Coiba se ubica en proximidad del punto triple, donde convergen las placas litosféricas de Cocos, Nazca y Caribe, es decir sobre una zona de debilidad tectónica que determinó la efusión de lavas basálticas a lo largo de fisuras localizadas justo en la línea divisoria entre las placas Cocos y Nazca. La

actividad volcánica terminó al final del Eoceno y ha permanecido inactiva hasta el presente.

Los fenómenos tectónicos que han afectado la isla han permitido la individualización de una estructura caracterizada por dos bloques separados por una depresión tectónica que atraviesa la isla con dirección ESE-ONO. El sistema principal de fallas está representado por dos lineamientos paralelos que limitan este graben. Además de su movimiento distensivo y gravitacional, parece que estas fallas han tenido también desplazamientos horizontales, lo cual sería normal considerando la posición de la isla en una zona de convergencia triple. Los bloques laterales a la depresión están intensamente fallados por sistemas secundarios de rumbo predominante NNE y NNO.

4.1.2 Geoquímica

El área de la Isla de Coiba fue seleccionada en base a la presencia de algunas manifestaciones termales. Las fuentes termales de la isla están localizadas cerca del contacto por falla entre los basaltos eocénicos y la formación lutítico-arenácea de la misma edad.

- Clasificación

Las cuatro muestras de agua de baja salinidad (3,5 - 6,2 meq/l) y baja temperatura (24 - 27°C) relacionadas con circuitos hidrogeológicos someros, tiene una composición bicarbonato-alcalino-térrica.

Las aguas termales tienen temperaturas de 40 - 50°C, TDS de 18 - 19 meq/l y composición sulfato-(cloruro)-sódica. El contenido de Mg es bajo, el contenido de Li es bajo y casi al límite de detección, el pH es muy alto (9,5 - 9,75) y se refleja en una presión parcial de CO₂ muy pequeña, un orden de magnitud menor del valor atmosférico.

Este valor de pCO₂ está confirmado por el análisis de los gases donde se encontraron sólo trazas de CO₂ en una mezcla de nitrógeno, principalmente.

El carácter sulfático, se debe muy probablemente a lixiviación de rocas hidrotermalizadas, mientras los altos contenidos de B y NH₃ están relacionados a las sustancias orgánicas contenidas en las rocas sedimentarias.

- Termometría Geoquímica

Los caracteres químicos de las aguas termales sugieren que no existe el equilibrio entre agua y roca en profundidad, como evidencian también los gráficos de correlación Na/K, Ca/K, Ca/Na y la discrepancia entre los resultados de cálculos geotermométricos distintos. Por lo tanto los métodos geotermométricos no

pueden ser aplicados (ver párrafo de metodología en el informe geoquímico de reconocimiento: Informe No. 18).

- Indicadores de fuga

La escasez de punto de agua fría en esta área no permite estudiar la distribución de los indicadores de fuga, la temperatura y la presión del anhídrido carbónico. De todas formas, los gráficos de correlación de ácido bórico, amoníaco y temperatura con los aniones fundamentales están indicados en las figuras 58 y 60 del informe geoquímico de reconocimiento (Informe No. 18). Cabe notar que el contenido de boro de las cuatro muestras de agua fría está siempre bajo el nivel de detección, y que los contenidos de amoníaco son relativamente bajos (entre 0,88 y 1,4 micro-moles/l).

Las presiones parciales de CO₂ son:

- a. Un poco mayor que el valor atmosférico en las dos muestras de agua de superficie.
- b. De 0,044 atm en el único manantial frío y de 0,0015 atm en el único pozo.

También el valor más alto puede estar controlado por procesos de oxidación de sustancias orgánicas en los suelos, más bien que por un flujo de gas rico en CO₂, de origen profundo. En efecto:

- a. Las presiones parciales de anhídrido carbónico en las aguas termales son de un orden de magnitud menor al valor atmosférico (valores similares se encuentran también en el área de Tonosí).
- b. La composición del gas muestreado en el manantial termal 55 es de nitrógeno principalmente, encontrándose solamente trazas de CO₂.

Por lo tanto no se observan anomalías a fuga de vapor desde sistemas geotérmicos.

En conclusión, los bajos contenidos de Li y SiO₂ sugieren que la temperatura del acuífero de procedencia es relativamente baja, pero los geotermómetros no permiten cuantificar con certidumbre esta evaluación cualitativa. Los contenidos de boro y amoníaco y la presión parcial del anhídrido carbónico son bajos y no permiten detectar anomalías geoquímicas relacionadas con la presencia de sistemas geotérmicos.

4.1.3 Evaluación geotérmica

Los resultados obtenidos en el curso del Estudio de Reconocimiento no permiten considerar a la Isla de Coiba como una zona de potencial interés geotérmico. En efecto, no hay ninguna eviden-

cia geológica o geoquímica en favor de la existencia de una anomalía térmica en la Isla. Las fuentes termales pueden estar relacionadas a la subida de aguas calientes a lo largo de fracturas que cortan una zona de gradiente térmico normal.

4.2 Tonosí

4.2.1 Geovulcanología

El área de Tonosí está ubicada en la parte meridional de la península de Azuero (Figura No. 2) en la Provincia de Los Santos. En la fase de programación de los estudios, el área de Tonosí fue considerada de interés potencial a causa de la presencia de cuatro manifestaciones termales con temperaturas de 37° a 48°C.

La geología (Anexo No. 1) es similar a la de la Isla de Coiba. No existen episodios de volcanismo reciente, siendo los productos volcánicos más jóvenes de edad Eocénica. Se trata de lavas y piroclastitas básicas con intercalaciones de conglomerados y areniscas volcanogénicas. La parte más antigua del área está conformada por una asociación ígnea de afinidad oceánica débilmente metamorfizada, que comprende una serie básica, prevalentemente constituida por lavas submarinas y un complejo ultrabásico con peridotitas y picritas. Asociados a las rocas volcánicas se encuentran depósitos sedimentarios oceánicos, como calizas síliceas y cherts. Arriba de este complejo ígneo, de edad mesozoica no bien definida, se encuentra una serie de calizas cretácicas interestratificadas con limolitas, areniscas y menores volcanitas. El área ha sido afectada por intrusiones ácidas (cuarzodioríticas) en el Terciario Inferior (50 Ma).

Las rocas cretácicas aparecen fuertemente dislocadas con pliegues cerrados, torsiones y fallas producidas a consecuencia de una tectónica compresiva. En períodos sucesivos, el área fue afectada por una intensa tectónica distensiva, con formación de una serie de grandes fallas con rumbo NO-SE y extensión regional. Otro sistema de fallas tiene rumbo E-O.

4.2.2 Geoquímica

Las manifestaciones termales del área de Tonosí están relacionadas a las grandes fallas regionales con rumbo NO-SE.

- Clasificación

Las aguas de baja salinidad (4 - 15 meq/l) y baja temperatura (26 a 29 °C) de esta área tienen una composición bicarbonato-alcalino-térrica, son las más alcalino térricas de todas las aguas muestreadas en este proyecto.

Las aguas termales y/o salinas se encuentran en tres localidades distintas y tienen caracteres composicionales diferentes entre sí:

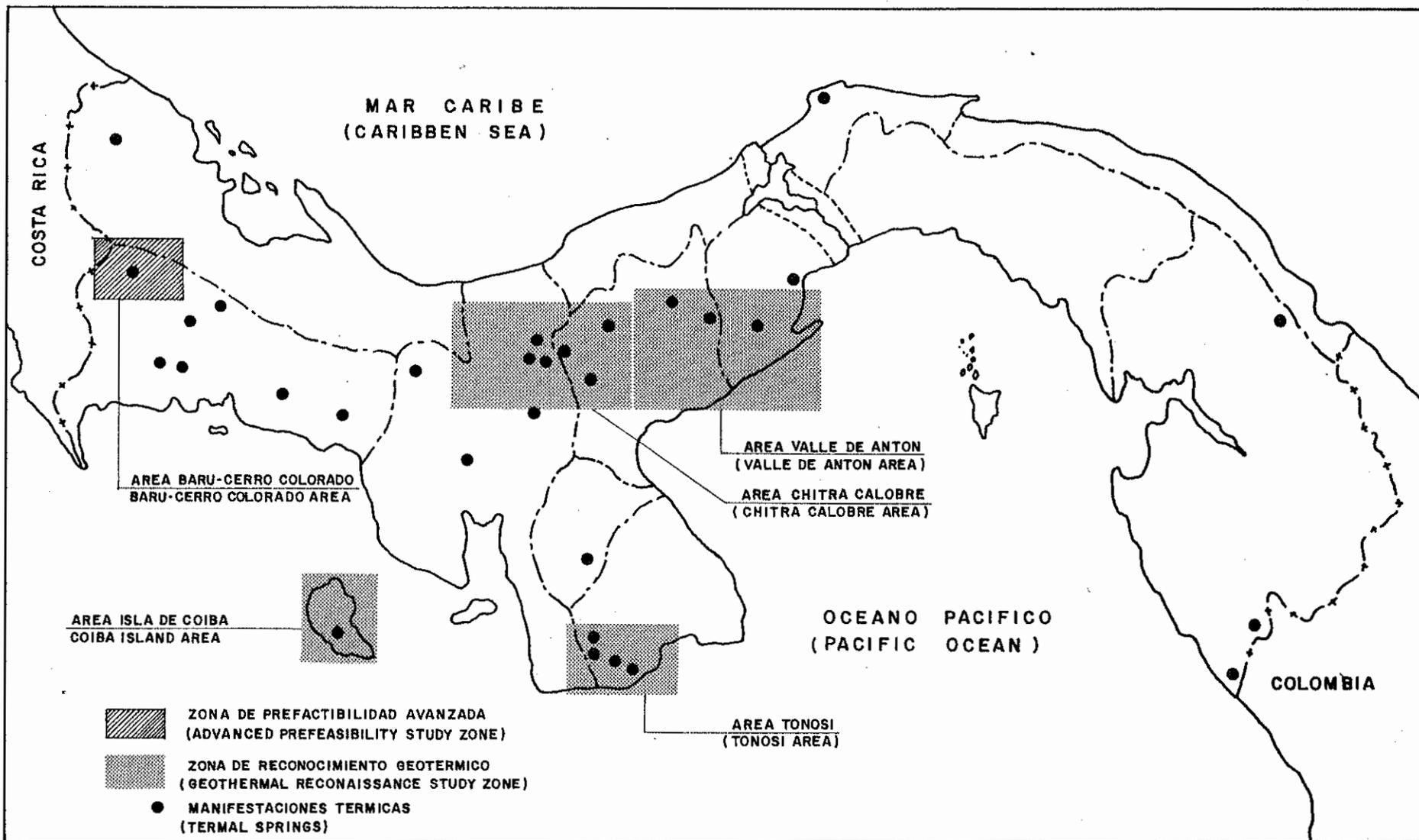


FIG. 2 — MAPA DE UBICACION
(LOCATION MAP)

a. Cloruro-alcálico-térrica en los Cerritos

T = 28°C
TDS = 80 meq/l
pH = 6,60

b. Cloruro-alcálicas en Agua Caliente

T = 39 - 46°C
TDS = 35 - 55 meq/l
pH = 9,40 - 9,60

c. (bi) carbonato-cloruro-alcálicas en Pedregal

T = 35 - 41°C
TDS = 5,4 - 7,6 meq/l
pH = 9,8 - 10,05

Hay que destacar los valores muy altos del pH, ya sea en Pedregal o en Agua Caliente, valores que se reflejan en presiones parciales de CO₂ muy bajas de (1x10⁻⁵) a (3 x 10⁻⁵) atmósferas, casi dos órdenes de magnitud menores que la de los ríos y aproximadamente tres órdenes de magnitud menores que las aguas frías. Estas indicaciones están confirmadas por el análisis del gas muestreado en Agua Caliente, que está constituido principalmente por nitrógeno, mientras el CO₂ fue detectado solo en trazas.

Todas estas aguas termales son muy bajas en Mg (las de Pedregal también en Ca) y tiene contenidos de Li menores al límite de detección. La sílice es generalmente baja, entre 42 ppm (Los Cerritos) y 75 ppm (Pedregal). El amoníaco y el boro por el contrario son altos en Pedregal y Aguas Calientes y son bajos en Los Cerritos. Considerando globalmente todas estas indicaciones se puede concluir que las aguas termales de Pedregal y Agua Caliente han evolucionado en un sistema cerrado o casi cerrado al anhídrido carbónico: los altos valores de amoníaco y boro y la composición del gas con nitrógeno principalmente, indican la presencia de condiciones reductoras y podrían estar relacionadas con la presencia de sustancias orgánicas en los sedimentos Eoceno-Oligocénicos.

- Geotermometría geoquímica

Los caracteres químicos de las aguas termales sugieren que no son representativos de equilibrio entre agua y roca en profundidad, como evidencian también los gráficos de correlación Na/K, Ca/K, Ca/Na y la discrepancia entre los resultados de los cálculos geotermométricos. Por lo tanto los métodos geotermométricos no pueden ser aplicados (ver párrafo de metodología en el Informe Geoquímico de Reconocimiento: Informe No. 18).

- Indicadores de fuga

Los diagramas de correlación de boro, amoníaco, temperatura vs.

los aniones (o los cationes) fundamentales no evidencian ninguna anomalía, si se exceptúa una muestra que tiene un contenido de amoníaco de 71 micromoles/l.

Considerando la distribución de la presión parcial de anhídrido carbónico se observa que los ríos presentan valores levemente superiores o iguales al valor atmosférico, mientras las aguas frías (fuentes y pozos) tienen $0,005 < pCO_2 < 0,036$ que pueden estar controlados por procesos de oxidación de sustancias orgánicas en los suelos, más bien que por un flujo de gas de origen profundo, rico en CO_2 . En efecto, como ya se ha observado:

- a. El gas muestreado en Agua Caliente está constituido principalmente por nitrógeno, mientras el CO_2 fue encontrado solo a nivel de trazas.
- b. Las aguas termales, en particular las de Agua Caliente y Pedregal, tienen pCO_2 muy bajas, un orden de magnitud bajo el valor atmosférico o todavía inferiores.

En este contexto la presencia de un sólo valor alto de amoníaco no puede ser considerada como una información de interés.

Se puede por lo tanto concluir que en esta área no se observan anomalías de indicadores de fuga, temperatura y anhídrido carbónico, relacionadas con la presencia de sistemas geotérmicos de alta entalpía.

4.2.3 Evaluación geotérmica

En síntesis, el área de Tonosí presenta las características siguientes:

- a. No existe actividad volcánica reciente ni evidencia de intrusiones jóvenes.
- b. Las manifestaciones termales están claramente relacionadas con sistemas de fallas profundas que permiten un ascenso muy rápido de aguas procedentes de circuitos profundos, donde se calentarían por un gradiente geotérmico poco anómalo.
- c. No hay evidencia de la existencia de fluidos de alta entalpía a una profundidad económica.

Todo esto sugiere que el interés geotérmico de la zona es limitado, principalmente por la falta de una anomalía térmica superficial. No parecen existir, por lo tanto, muchas perspectivas para recursos geotérmicos utilizables para producción de energía eléctrica.

Sin embargo, es importante subrayar la probable existencia de recursos geotérmicos de entalpía media a baja. La situación estructural e hidrogeológica del área, en particular la presen-

cia de formaciones con buena permeabilidad potencial (lavas, calizas), el fuerte grado de fracturación debido a la gran densidad de fallas y la evidencia de subida de fluidos calientes, ofrecen buenas perspectivas en este sentido. En tal virtud, se elaboró un programa para la utilización de los recursos geotérmicos de baja y media entalpía en el área de Tonosí, que se presenta en el Capítulo 7 del presente Informe.

4.3 Chitra-Calobre

Al final de la primera fase de los Estudios de Reconocimiento, el área de Chitra-Calobre fue seleccionada como una de las más prometedoras del país (ver Informe No. 22). La Junta Asesora del Proyecto, en su tercera reunión (abril 1986, ver Informe No. 23) recomendó sobre esta área, completar los estudios geovulcanológicos, petrográficos y petrológicos. En este informe se sintetizan todos los resultados obtenidos tanto en la primera fase como en la fase de las investigaciones adicionales.

4.3.1 Geovulcanología

- El basamento terciario

El área de Chitra-Calobre se ubica en las provincias de Veracruz y de Coahuila, siendo limitada por las coordenadas 80°36' y 82°00' de longitud occidental y 8°34' y 8°18'20" de latitud norte (Figura No. 2 y Anexo No. 1). El área tiene una superficie aproximada de 1 300 kilómetros cuadrados y se extiende desde la vertiente meridional de la Cordillera Central hasta las colinas bajas de la región pedemontana. El área está geológicamente caracterizada por la presencia de un basamento ígneo de edad Terciaria. Esto incluye cuerpos intrusivos, así como una potente serie volcánica de cobertura.

Las rocas intrusivas en el área de estudio se concentran en una franja longitudinal a lo largo de la Cordillera Central, constituyendo prácticamente en este sector la columna vertebral de la misma. Tienen una edad comprendida entre el Oligoceno y el Mioceno superior o el Plioceno, como indican los fenómenos de metamorfismo de contacto producidos en las volcanitas miocénicas encajantes. Estas intrusiones tienen una composición de intermedia a ácida y pueden existir debajo de los depósitos volcánicos, también en la parte de interés geotérmico del área. La serie volcánica terciaria (edad Mioceno medio y superior) constituye la mayor parte del basamento aflorante. Esta serie comprende dos diferentes formaciones principales:

- a. Formación Cañazas, constituida mayormente por lavas con menores aglomerados y piroclastitas.
- b. Formación La Yeguada, constituida principalmente por ignimbritas.

La formación Cañanzas (espesor total cerca 1 000 metros) comprende varias unidades litológicamente distintas entre sí. La parte estratigráficamente más baja está constituida por basaltos de origen fisural. Arriba de esta unidad se encuentran rocas de distinta naturaleza (de andesita a andesita basáltica) que han dado edades K-Ar comprendidas entre 12 y 13 Ma. Estas rocas un poco más evolucionadas con respecto a los basaltos, se originaron por erupciones desde volcanes centrales. Estos edificios están ahora muy erosionados y solo quedan restos de las antiguas estructuras. Abundantes son los depósitos piroclásticos tipo tobas arcillificadas y aglomerados rojizos y se observan también intercalaciones de niveles volcano-sedimentarios continentales.

La formación "La Yeguada" está ampliamente distribuida en la zona de cumbre de la Cordillera y en sus vertientes. Más hacia el sur de la Cordillera, en la zona pedemontana y en la peniplanicie, las rocas de esta formación han sido profundamente afectadas por agentes erosivos, conservándose de ellas solo unos pequeños islotes.

Se trata de una espesa serie de depósitos piroclásticos constituidos principalmente por cubiertas ignimbríticas, tobas arcillificadas y brechas explosivas con grandes bloques, estratificadas en bancos de grandes espesores, que modelan un paisaje a menudo plano tipo meseta, cortado por la tectónica en grandes bloques basculados.

Estas ignimbritas tienen composición ácida, de dacita a riolita, y edades de 13 a 9 Ma, con parcial sobreposición temporal a la actividad lávica del ciclo precedente.

En conclusión se puede notar cómo el vulcanismo terciario tuvo su máxima actividad en el Mioceno Superior, entre 13 y 19 Ma y la actividad ignimbrítica marca la fase final del ciclo miocénico. En el Plioceno el vulcanismo es mucho más reducido o posiblemente ausente; se pueden atribuir a este período algunas estructuras volcánicas de posición estratigráfica incierta (ej: El Cerro San Andrés que se encuentra sobre las ignimbritas).

En el Plioceno Superior a Pleistoceno la actividad volcánica se presenta nuevamente, pero en forma mucho más reducida, con la formación de los aparatos volcánicos más recientes.

- El vulcanismo pliocuaternario

Después de la fase de inactividad pliocénica, el vulcanismo se reactivó en el Plioceno Superior y continuó en esta área hasta épocas muy recientes. Este vulcanismo, esencialmente de edad Cuaternaria, está caracterizado por edificios aislados de dimensión reducida, constituidos principalmente por productos ácidos, de naturaleza dacítica. Solamente el pequeño cono de escorias con flujos de lava asociados de la "Media Luna", tiene una composición básica (basalto shoshonítico).

El volcanismo ácido reciente incluye pequeños aparatos compuestos (La Montañuela), domos de lava dacítica (El Picacho de Olá y El Esquinado), y domos explosionados con flujos de cenizas y avalanchas de escombros (El Castillo). Las edades K-Ar varían de 2,43 Ma (La Montañuela), 1,9 - 1,7 Ma (El Picacho de Olá y El Esquinado) hasta 0,22 Ma en El Castillo. El basalto shoshonítico de la Media Luna tiene una edad muy inferior, menor a 0,1 Ma.

El Castillo es el más joven y más interesante de los edificios cuaternarios. Está constituido por un "horst" volcano tectónico miocénico limitado por fallas con rumbo NO-SE, y conformado por lavas andesíticas y basálticas de la Formación "Cañazas" e ignimbritas de la Formación "La Yeguada". La actividad reciente se ubica en la parte septentrional del horst en correspondencia con un cruce de importantes fallas con rumbo NNO-SSE, ENE-OSO, NO-SE y consiste en la extrusión de domos lávicos asociados a fenómenos explosivos que produjeron depósitos tipo "nube ardiente".

Los estudios petrológicos han indicado que los líquidos dacíticos fueron producidos a través de un proceso de cristalización fraccionada en el interior de cámaras magmáticas superficiales. En particular ha sido estimado que los productos ácidos (riodacíticos) de "El Castillo" fueron eruptados a una temperatura de 750 °C y corresponden a magmas generados a una presión muy baja (pH₂O inferior a 1 K bar) correspondiente a una profundidad de sólo 3 a 4 kilómetros.

- Marco tectónico

Una actividad tectónica muy intensa ha interesado el área de Chitra como se puede notar ya sea en la morfología de los relieves como en el drenaje superficial claramente controlado por fallas y fracturas.

El lineamiento original de la Cordillera Central tiene un rumbo promedio NO-SE; esta dirección tectónica de carácter regional es la más antigua en la zona y ha sido activa hasta el Plioceno superior. En la Cordillera faltan los pliegues y su formación es más bien debida a la acumulación de grandes espesores de productos volcánicos.

En épocas más recientes una nueva fase tectónica muy importante ha producido el característico modelo estructural en bloques monoclinales escalonados separados por grandes fallas con rumbo ENE-OSO hasta E-O. Este tectonismo afecta la formación Cañazas y, sobre todo, la formación ignimbrítica "La Yeguada" donde es muy evidente.

Los sistemas de fallas secundarias al anterior están muy bien marcados en el área y tienen alineaciones NO-SE y en menor grado N-S. El sistema principal y los secundarios a él, parecen contemporáneos y en su conjunto, configuran una red tectónica muy densa.

4.3.2 Geoquímica

En el curso de la primera fase del Estudio de Reconocimiento habían sido identificadas y muestreadas cinco fuentes termales o anómalas por su salinidad o contenido en gas. Las investigaciones geológicas de mayor detalle han permitido identificar otras fuentes termales, casi todas ubicadas alrededor del Cerro "El Castillo". Considerando el interés potencial de los resultados geovulcanológicos obtenidos en el estudio complementario, se decidió, en atención a lo recomendado por la Junta Asesora del Proyecto, completar en el área de Chitra-Calobre un estudio a nivel de Prefactibilidad, realizando investigaciones geoquímicas adicionales y un estudio geofísico en la zona de "El Castillo". Los resultados aquí resumidos se refieren sólo a la fase del estudio geoquímico de Reconocimiento, estando todavía en curso la fase de Prefactibilidad.

Las aguas someras de Chitra-Calobre presentan características composicionales muy variables, relacionadas con la interacción de aguas meteóricas con litotipos volcánicos diferentes y/o caracterizados por un diferente estado de alteración. En particular se pueden reconocer las siguientes cuatro clases:

a. Bicarbonato-alkalino-térrea

T= 25 - 28°C;
TDS= 2 - 4 meq/l

b. Bicarbonato-alkalino-térrea con débil tendencia cloruro-sódica o cloruro-sulfato-sódica

T= 25 - 26°C;
TDS= 1 - 2,5 meq/l

c. Bicarbonato-sódica

T= 22 - 26°C;
TDS= aproximadamente 1 meq/l

d. Bicarbonato-sulfato-alkalino-térrea

T= 21 - 26°C;
TDS= 2 - 7 meq/l

A pesar de esta variabilidad composicional, los parámetros físico-químicos fundamentales no son muy diferentes de un tipo hidroquímico al otro, si se exceptúan unas muestras particulares. El estudio de la distribución de los indicadores de fuga en las aguas someras de la región investigada, evidencian la presencia de anomalías de amoníaco, temperatura y anhídrido carbónico. Faltan las anomalías de ácido bórico que están relacionadas con fuga de vapores geotérmicos desde sistemas de alta entalpía. Estas anomalías se encuentran entre la fuente termal de "El Salitre" y los manantiales termales de "Calobre" y unos kilómetros al sur de estos últimos. Este hecho nos indica que la

subida de fluidos termales no ocurre solamente donde se encuentran los manantiales calientes si no también en estas áreas anómalas.

Entre las aguas calientes estudiadas se pueden distinguir las tres clases siguientes:

e. Sulfato (bicarbonato)-alcalino-térrea

T= 31 - 34°C;
TDS= 50 - 95 meq/l

f. Sulfato-sódico-cálcica

T= 44 - 53°C;
TDS= aproximadamente 60 meq/l

g. Cloruro-alcalina

| | |
|------------------|----------------------------|
| El Salitre: | T= 26°C; TDS= 180 meq/l |
| Huacas de Quije: | T=25°C; TDS=31 meq/l |

El carácter sulfatado de los tipos químicos e y f, que se originan muy probablemente por lixiviación de sulfatos desde rocas volcánicas hidrotermalizadas, nos indica que estas aguas están relacionadas con circuitos relativamente poco profundos.

Solamente para las aguas termales cloruro-alcalinas se puede suponer una relación con circuitos hidrogeológicos relativamente más profundos y aplicar las técnicas geotermométricas; estas indican temperaturas de 81°C en "Huacas de Quije" y de 85°C en "El Salitre". Estas bajas temperaturas de equilibrio (que están de acuerdo con la falta de anomalías de ácido bórico en el área investigada) no son necesariamente indicaciones negativas. En efecto, los dos manantiales clorurados están localizados en los márgenes del área, caracterizada por la presencia ya sea de anomalías de fuga de vapor o de manantiales termales en Calobre.

Por lo tanto, las aguas cloruradas podrían representar descargas marginales de un sistema geotérmico ubicado en la zona central del área investigada. La migración lateral del fluido geotérmico determinaría el enfriamiento y reequilibrio a temperaturas relativamente bajas.

4.3.3 Modelo geotérmico preliminar de El Castillo

La zona de El Castillo, dentro del área de Chitra-Calobre, es la que ofrece características más prometedoras para un posible desarrollo geotérmico.

Por lo tanto, se presenta a continuación (Figura No. 3) un modelo geotérmico preliminar para esta zona, que tendrá que ser confirmado por las investigaciones geofísicas.

- Fuente de calor

El Castillo posee las siguientes características en cuanto se refiere a fuente de calor:

Los productos emitidos constituyen una serie con afinidad calco-alcalina desde basaltos a dacitas y riodacitas, producidas a través de procesos de diferenciación por cristalización fraccionada en una cámara magmática muy superficial. Los cálculos geotermométricos y geobarométricos sugieren una presión de formación de los líquidos diferenciados de menos de 1 kbar o sea una profundidad de la cámara de 2 a 4 km y una temperatura probable para las dacitas de 750°C.

La aplicación de un modelo cuantitativo de fraccionamiento indica que el magma riodacítico representa cerca del 22% en volumen de un magma basáltico primario. Considerando que el volumen de los productos evolucionados emitidos es de 0,5 a 1 km cúbico, el volumen de la cámara magmática sería de solo 2 a 4 km cúbicos. La edad de estas dacitas es de 200.000 años.

Sin embargo, hay que considerar que el material emitido podría representar la manifestación superficial de una gran intrusión de magma ácido en proceso de enfriamiento en los niveles someros de la corteza terrestre (no se olvide la ocurrencia de afloramientos de cuerpos granodioríticos pliocénicos en el área) así que la anomalía térmica sería mucho más importante de lo que se puede estimar con los datos presentes. La gran cantidad de manifestaciones termales que ocurren en un área centrada en El Castillo podría confirmar esta hipótesis.

- Reservorio

Un intenso tectonismo distensivo ha afectado El Castillo también en tiempos recientes, como es sugerido por el cruce de tres fallas con rumbo NNO-ENE y NO que cortan los domos pleistocénicos; así se ha producido una intensa fracturación en los flujos lávicos andesíticos y basálticos que integran el basamento del edificio. Además, este sector de la cordillera está constituido por rocas que no están intemperizadas y alteradas como ocurre en otras zonas (véase Chiriquí). Estas dos observaciones brindan la posibilidad de encontrar una buena permeabilidad en el subsuelo de El Castillo en correspondencia con los horizontes lávicos.

Está asegurada una recarga local por la infiltración profunda en correspondencia a los domos, "necks", diques y las estructuras circulares. Un importante flujo regional de agua subterránea va desde las zonas de cumbres de la Cordillera (al norte de El Castillo) hacia abajo.

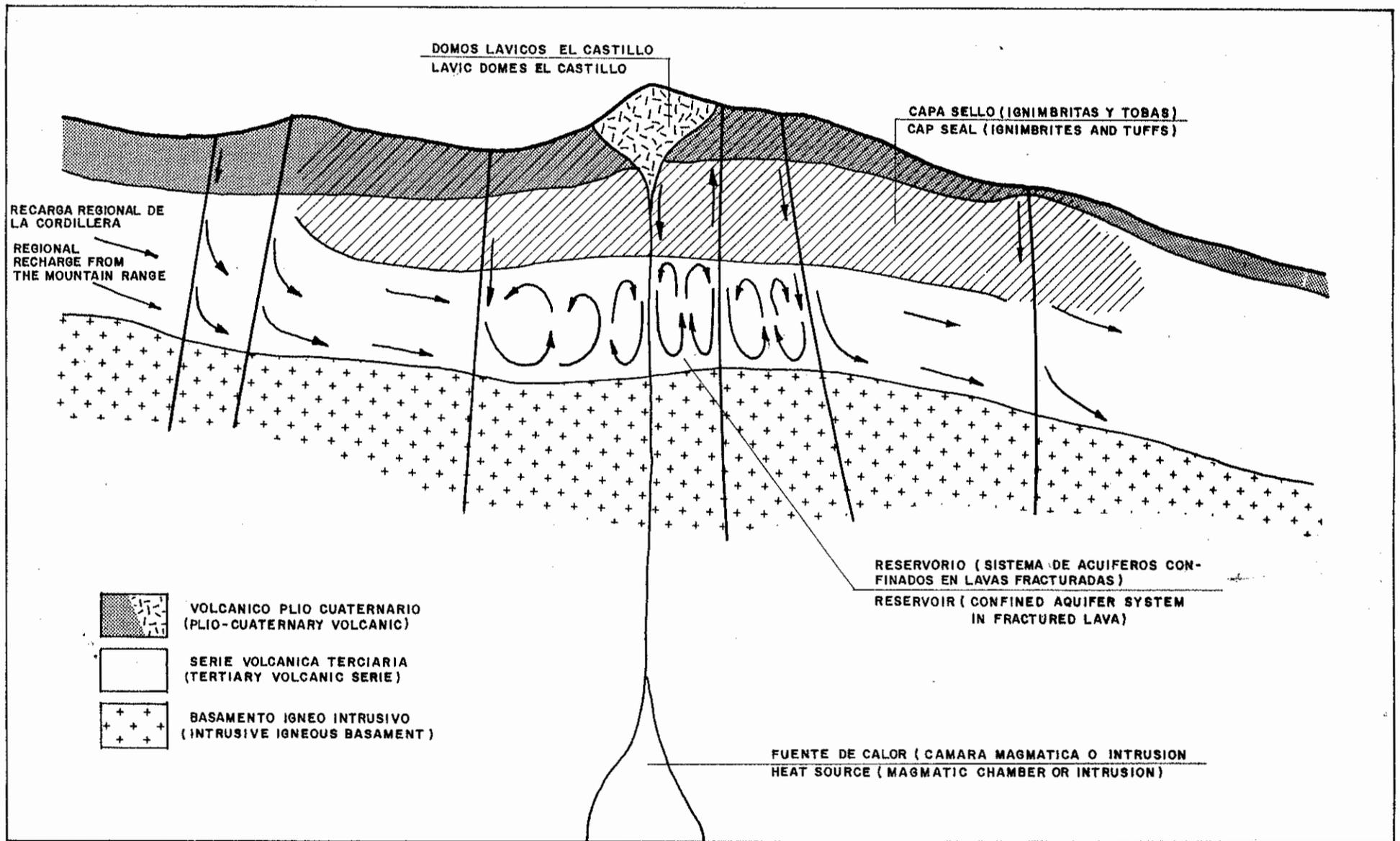


FIG. 3 MODELO GEOTERMICO PRELIMINAR DE LA ZONA DE EL CASTILLO (CHITRA CALOBRE) BASADO SOBRE LOS DATOS GEOVOLCANOLOGICOS Y GEOQUIMICOS DEL ESTUDIO DE RECONOCIMIENTO.

PRELIMINARY GEOTHERMAL MODEL OF THE EL CASTILLO (CHITRA CALOBRE) ZONE FROM THE GEOVOLCANOLOGICAL AND GEOCHEMICAL DATA OF THE RECONNAISSANCE STUDY

En los productos piroclásticos no se han encontrado líticos hidrotermalizados para confirmar la termalidad del acuífero; esto estaba casi previsto considerando que la actividad eruptiva de baja energía relacionada a la explosión superficial de los domos, difícilmente habría podido muestrear los horizontes profundos donde, probablemente, se ubica el reservorio.

- Capa sello

Un nivel impermeable con buena función de capa sello puede ser identificado por la presencia de una cubierta ignimbrítica sobre la formación lávica, que se presenta a menudo argilitizada en particular en las facies más tobáceas. Estas rocas se encuentran en la parte antigua de El Castillo, donde posiblemente se originaron.

En resumen, las perspectivas geotérmicas de El Castillo son las más prometedoras del área de Chitira-Calobre. Quedan solo algunas dudas sobre lo que se refiere a la dimensión de la fuente de calor. De todas maneras esta zona merece una exploración adicional, y en particular la realización de un estudio geofísico enfocado a la identificación de las principales estructuras, y a la caracterización cuantitativa de los niveles que podrían actuar como reservorio y como cobertura del sistema geotérmico.

4.4 El Valle de Antón

Al final de la primera fase de los Estudios de Reconocimiento, el área de El Valle de Antón resultó como la más prometedora de todo el país. En consecuencia, la Junta Asesora del Proyecto recomendó en su Tercera Reunión (abril 1986, ver Informe No. 23) la ejecución de estudios geovulcanológicos y geoquímicos complementarios, así como, la realización de investigaciones geofísicas (gravimetría y geoelectrica). Todos estos estudios han permitido alcanzar un grado de conocimiento del área a nivel de prefactibilidad, como vendrá indicado a continuación.

4.4.1 Geovulcanología

- El basamento terciario

El complejo volcánico de El Valle de Antón se encuentra ubicado cerca del límite entre las provincias de Coclé y de Panamá. Se localiza en la parte pacífica de la división continental y cerca de ésta (Figura No. 2). El elemento característico de la geología del área es la presencia de un edificio volcánico cuaternario, el Valle de Antón, ubicado sobre una estructura del basamento terciario (ígneo) de la Cordillera de Panamá (Anexos Nos. 1 y 2). El basamento que se encuentra por debajo del edificio de "El Valle" está formado únicamente por rocas volcánicas de edad Terciaria.

No se han reconocido rocas intrusivas, que se encuentran por el contrario ampliamente difundidas en toda la Cordillera Central al

oeste de El Valle. También los xenolitos presentes en los depósitos piroclásticos de El Valle están constituidos exclusivamente por rocas volcánicas. Esta información sugeriría que, en caso de existir cuerpos intrusivos, estos estarían ubicados en zonas profundas de la corteza terrestre. Las volcanitas que constituyen el basamento terciario, aún si forman una secuencia muy compleja, pueden ser agrupadas en dos formaciones: la más antigua, de carácter predominante ignimbrítico y otra constituida por lavas, aglomerados y tobas. Las ignimbritas tienen una edad del Mioceno medio (13 - 14 Ma) y se encuentran en dos áreas ubicadas hacia el Pacífico, al sureste y al suroeste de El Valle, respectivamente. Los productos piroclásticos de El Valle las cubren en la faja que se halla ubicada entre las dos áreas antes mencionadas.

La formación volcánica terciaria, constituida por lavas, tobas y aglomerados, se encuentra estratigráficamente por encima de las ignimbritas y tiene una edad del Mioceno medio y superior (10 - 15 Ma). Estas volcanitas son los productos de una actividad muy intensa y compleja que se originó en una serie de aparatos volcánicos, ahora erosionados, que forman la parte alta de la Cordillera. Se pueden reconocer todavía los restos de estructuras volcánicas tales como: cráteres, trazas de calderas, escarpes morfológicos debido probablemente a deslizamientos sobre el flanco de los volcanes provocados por erupciones direccionales (ej: Cerro Picacho). En varias ocasiones se ha observado que las rocas volcánicas terciarias se encuentran afectadas por hidrotermalismo fósil, que modifica sus condiciones primarias. En efecto, las lavas se presentan más o menos alteradas (argilitizadas), calcitizadas, cloritizadas y/o silicificadas) y desde el punto de vista petrográfico son relativamente homogéneas siendo representadas esencialmente por andesitas con dos piroxenos.

Los aglomerados y las tobas que pertenecen a la formación terciaria están generalmente muy argilitizados y presentan colores rojizos, blanquecinos y amarillos; los bloques todavía reconocibles en el interior de los aglomerados son principalmente de naturaleza básica (andesítica) pero hay una gran variedad litológica que sugiere que originalmente estos depósitos estuvieron constituidos fundamentalmente por "lahares" (flujos de lodo). Los productos originados por la actividad del centro eruptivo de El Valle se apoyan directamente sobre las lavas y aglomerados miocénicos del basamento, que en efecto afloran en varios lugares en la base de la pared caldérica de El Valle de Antón.

- El edificio volcánico de El Valle de Antón

La historia eruptiva de El Valle de Antón es muy compleja. La actividad eruptiva del volcán abarca un período de alrededor 1,5 a 2 Ma de duración, como indican las dataciones radiométricas obtenidas en el Estudio de Reconocimiento.

En la fase inicial, la actividad tuvo un carácter predominantemente efusivo, con producción de coladas lávicas de naturaleza no muy evolucionada (andesitas con dos piroxenos) y con depósitos piroclásticos asociados con material volcánico terciario. Varios

son los afloramientos de rocas terciarias muy cerca y dentro de El Valle, no parece por lo tanto, que la actividad precaldera de El Valle haya producido un edificio de grandes dimensiones.

La fase sucesiva está caracterizada por la formación de las estructuras de colapso caldérico de la parte alta del edificio. Los estudios vulcanológicos han permitido establecer la presencia de dos distintas estructuras de colapso: la caldera de "La Mesa" y la caldera de El Valle (Figura No. 4).

La caldera de La Mesa es la más antigua y está cortada por la de El Valle. Su fondo tiene un nivel 300 metros más alto que el fondo de El Valle, e indica un colapso de menor importancia. Las dos calderas tienen también diferencias morfológicas: El Valle es una depresión muy marcada con paredes hasta de 200 m, mientras que La Mesa (su nombre lo confirma) no es una depresión limitada por un escarpe morfológico, si no más bien un plano elevado (Figura No. 5).

La caldera de La Mesa tiene dos posibles interpretaciones, la primera posibilidad es que sea una clásica estructura de colapso caldérico limitada por fallas anulares. En este caso la subsidencia vertical ha sido pequeña así que los depósitos piroclásticos sucesivos la rellenaron enmascarando la depresión original. La segunda posibilidad es que se trate de una caldera marcada por una suave depresión de la superficie del terreno sin fallas anulares evidentes.

No se puede decir mucho sobre la(s) erupción(es) que produjeron la caldera de La Mesa por estar cubierta(s) por las numerosas erupciones sucesivas, pero seguramente tuvieron un carácter explosivo y diferenciado. El techo del basamento lávico terciario debe encontrarse a poca profundidad, como lo indica la ocurrencia de afloramientos en su lado norte (Figura No. 6).

La reconstrucción vulcanológica y petrológica indica que un poco antes (1,1 - 1,3 Ma) se formó bajo El Valle una cámara magmática bastante somera donde el magma permaneció estacionado por cierto tiempo. Así, el magma andesítico primitivo pudo diferenciarse por gravedad originando un líquido evolucionado y muy enriquecido en volátiles. Este tipo de magma (ácido y cargado en gases, H₂O sobretodo) provocó erupciones fuertemente explosivas (plinianas) que produjeron grandes volúmenes de depósitos piroclásticos y el consecuente vaciamiento de la cámara magmática, con la formación de la caldera de El Valle.

El estudio detallado de cortes geológicos ubicados alrededor de El Valle y su correlación, ha permitido averiguar cómo la actividad explosiva se caracterizó por numerosas y grandes erupciones cuyas secuencias y modalidades eruptivas han sido reconstruidas. En particular han sido identificadas por lo menos dos grandes erupciones de tipo Pliniano, la segunda de las cuales probablemente determinó el colapso caldérico.

Después del colapso caldérico, el magma desgasificado que permanecía aún en la cámara, fue extruido hacia la superficie a lo largo de las mismas fracturas anulares que habían controlado el colapso, para dar origen a varios domos de composición dacítica, todos con edades de cerca a 1 Ma, que se encuentran sobre el borde de la caldera misma. Los más evidentes son el Cerro Gaital, el Cerro Caracoral y el Cerro Pajita que se encuentran alineados a lo largo de la falla norte que limita la caldera entre El Valle y La Mesa. A esta fase de actividad postcaldera pertenecen también los domos Caparita y Cerro Guacamayo que se encuentran en los sectores este y sureste del borde caldérico, en parte cubiertos por el piroclástico reciente.

La actividad postcaldera incluye también importantes episodios explosivos y algunos cráteres cortan los domos lávicos postcaldera. Estos incluyen depósitos de tipo nube ardiente y otros de naturaleza hidromagmática, resultantes de la interacción del magma con el agua de un lago que ocupaba la depresión caldérica de El Valle. Por encima de estas piroclástitas, marcadas por alternancia de paleosuelos, se encuentran otros potentes depósitos piroclásticos que incluyen varias erupciones de gran energía. La falta de paleosuelos indica edades jóvenes para estos depósitos del ciclo reciente del complejo volcánico de El Valle.

La primera y probablemente más grande erupción del ciclo reciente ha sido denominada "Río Mar" por el lugar donde se halla su afloramiento más característico. Esta erupción tuvo un carácter de intensa explosividad y expulsó un volumen de magma muy grande. Se pueden observar sus depósitos en las vertientes y en las paredes de la caldera en los sectores suroeste y sur de El Valle; esta erupción cubrió el escape morfológico y el fondo de la depresión caldérica.

La gran erupción pliniana de Río Mar tiene una edad comprendida entre 40 000 y 50 000 años y representa el evento de mayor energía de la actividad postcaldera del edificio El Valle de Antón. La erupción fue alimentada por un cráter excéntrico situado probablemente entre el Cerro Gaital y el Cerro Pajita. La actividad explosiva continuó también después de la erupción de Río Mar produciendo varios depósitos piroclásticos e incluyendo otra gran erupción Pliniana que ha sido datada en 34 600 años atrás. Los productos del ciclo más reciente de actividad tienen una composición muy evolucionada, riolítica. La variación areal de los espesores de los depósitos, así como de las máximas dimensiones de los constituyentes indican que su zona de procedencia más probable se ubica al este de la caldera del Valle, donde existe una estructura de forma circular (Mata Ahogado) de unos 2,5 km de diámetro con trazas de escarpe morfológico que podría indicar su naturaleza caldérica (Figura No. 4).

Los xenolitos en los depósitos piroclásticos están representados por lavas similares a las del basamento miocénico, por tobas argilizadas y por lavas dacíticas similares a las de los domos postcaldera. No se han observado evidencias de alteración hidro-

termal de alta temperatura. El tipo de alteración observada indicaría una procedencia de la parte superficial sellada de un sistema geotérmico.

- La cámara magmática de El Valle de Antón

Los estudios petrológicos y geoquímicos de los productos erup-tados por el edificio de El Valle de Antón han permitido re-construir la evolución petrogenética y estimar los parámetros principales de la cámara magmática de alimentación. Los pro-ductos de El Valle pertenecen a una serie calcoalcalina normal, con campo de variación de andesitas (lavas) a riolitas (piroclás-tos).

Las variaciones mineralógicas y químicas observadas son compati-bles en su conjunto con un proceso de diferenciación por crista-lización fraccionada desarrollada a presiones bajas en el inte-rior de una cámara magmática superficial.

El origen de los magmas ácidos a través de un proceso de diferen-ciación de magmas andesíticos está confirmado además por la mineralogía y la química, así como por la constante de compo-sición isotópica del Estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) entre muestras que cubren casi todo el sistema (trend) de variación composicional de El Valle. Además los valores bajos de la relación isotópica ($0,7036 - 0,7038$) excluyen la posibilidad de intervención de procesos de anatexis crustal para las dacitas, quedando solo la posibilidad de una liviana y subordinada contaminación crustal.

Un modelo cuantitativo de fraccionamiento aplicado a la serie arriba mencionada (andesita-dacita-riolita) indica que el magma riolítico representa cerca del 44% de un magma andesítico prima-rio. Este resultado ha permitido estimar un volumen mínimo de aproximadamente 27 km cúbicos para la cámara magmática de El Valle.

En el marco de los estudios petrológicos adicionales fueron también valorizadas las condiciones de presión y temperatura del magma en el interior de la cámara. La estimación geobarométrica sugiere que los líquidos riolíticos fueron generados bajo una P_{H_2O} de cerca 1 kb (con una temperatura aproximada de 800°C). Considerando el magma saturado en agua o casi, la profundidad de la cámara magmática debería estar comprendida entre 3 y 5 km.

La temperatura de emisión de los productos más diferenciados (riolíticos) ha sido estimada en 700°C , mientras que la del magma andesítico resulta un poco superior 900°C . Este valor parece bajo para un magma andesítico y probablemente refleja procesos de equilibrio de los dos piroxenos, usados para el cálculo geotermo-métrico en el interior de la cámara magmática superficial.

- Marco tectónico

Los sistemas de fallas y/o fracturas que afectan el área tienen direcciones principales NO-SE y NE-SO y también N-S y E-O. La presencia de distintas familias de fallas concentradas en la misma área explica la presencia de un volcán central de este tamaño y que permanece activo a lo largo del tiempo.

Las direcciones ortogonales NO-SE y NE-SO resultan evidentes en la zona caldérica misma:

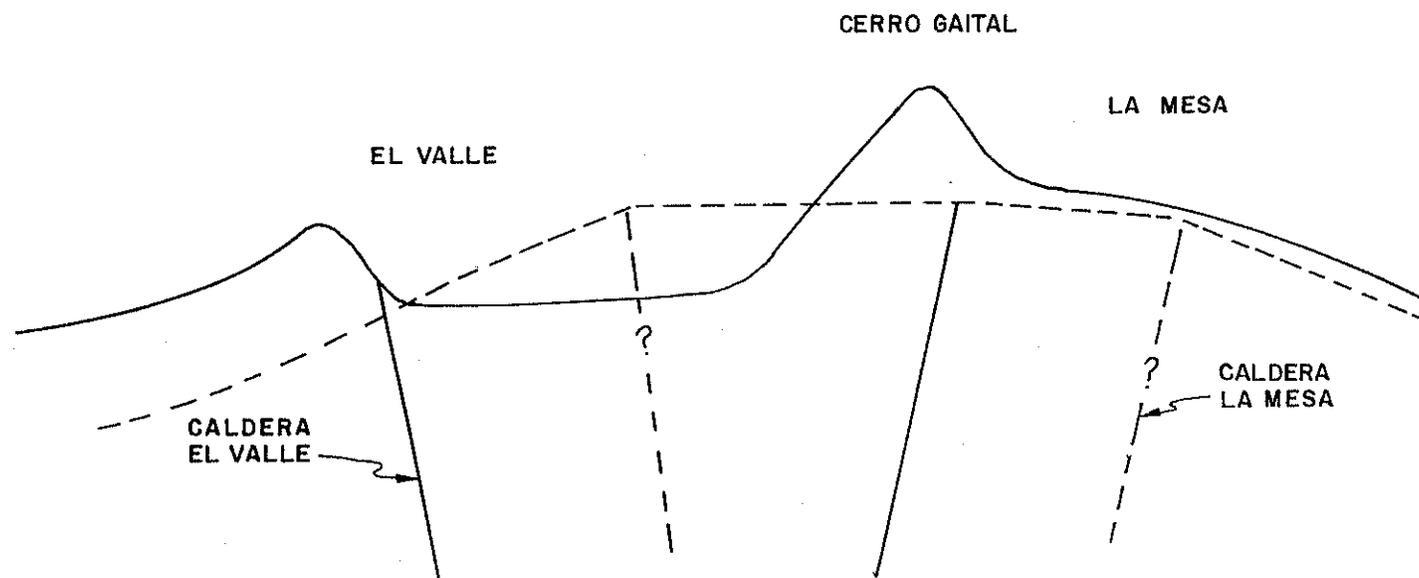
- a. La primera afecta los tres domos alineados y continúa a través del curso superior de los Ríos Teta y Mata Ahogado hacia el sureste; tiene muy probablemente una edad reciente cortando rocas de 1 Ma de edad.
- b. La segunda afecta el borde suroeste de la caldera donde se hallan el Río Antón y los Cerros Turega y Yegua Buena al noroeste.

La falla del Río Antón parece particularmente importante y activa desde largo tiempo, como está demostrado por el afloramiento en su curso superior, cerca de la caldera, de los flujos piroclásticos recientes que bajaron por un valle ya existente. Los manantiales termales que se encuentran en la parte suroeste de la caldera están relacionados con esta segunda falla y con otra E-O. La dirección tectónica NE-SO es muy evidente también en el área de Mata Ahogado.

La dirección N-S aparece evidente en los sectores externos septentrionales y orientales del Valle cortando el curso del río Las Minas y el Cerro Pelado al norte y el curso superior del río de Jesús Ahogado, mientras no ha sido reconocida al sur y el oeste.

La dirección E-O está marcada por el alineamiento de los domos Pajita, Gaital, Caracoral y de los ríos Sofrito y Zarati. Este alineamiento es muy importante y parece representar una línea de debilidad estructural profunda que ha jugado un papel importante en el desarrollo de la actividad volcánica en El Valle. En efecto, a lo largo de esta fractura se ubicaron en tiempos sucesivos:

- a. Posiblemente el conducto volcánico que alimentó la(s) erupción(es) de La Mesa.
- b. La parte Norte de la falla anular de la caldera de El Valle.
- c. Los domos postcaldera.
- d. Los conductos volcánicos de los dos cráteres que cortan los domos.
- e. El centro eruptivo de Mata Ahogado, aunque un poco trasladado hacia el este.

S**N**

**FIG. 5 PERFIL MORFOLOGICO ESQUEMATICO N-S LA MESA, EL VALLE
Y RELACIONES ESTRUCTURALES ENTRE LAS DOS CALDERAS**

**(N-S SCHMATIC MORPHOLOGICAL PROFILE LA MESA, EL VALLE
AND STRUCTURAL RELATIONSHIPS BETWEEN BOTH CALDERAS)**

**La Mesa puede ser interpretada sea como caldera de colapso
limitada por fallas anulares sea como caldera "downsagged"**

**(La Mesa can interpreted either as a collapse caldera limited
by annular faults or as a downsagged caldera.)**

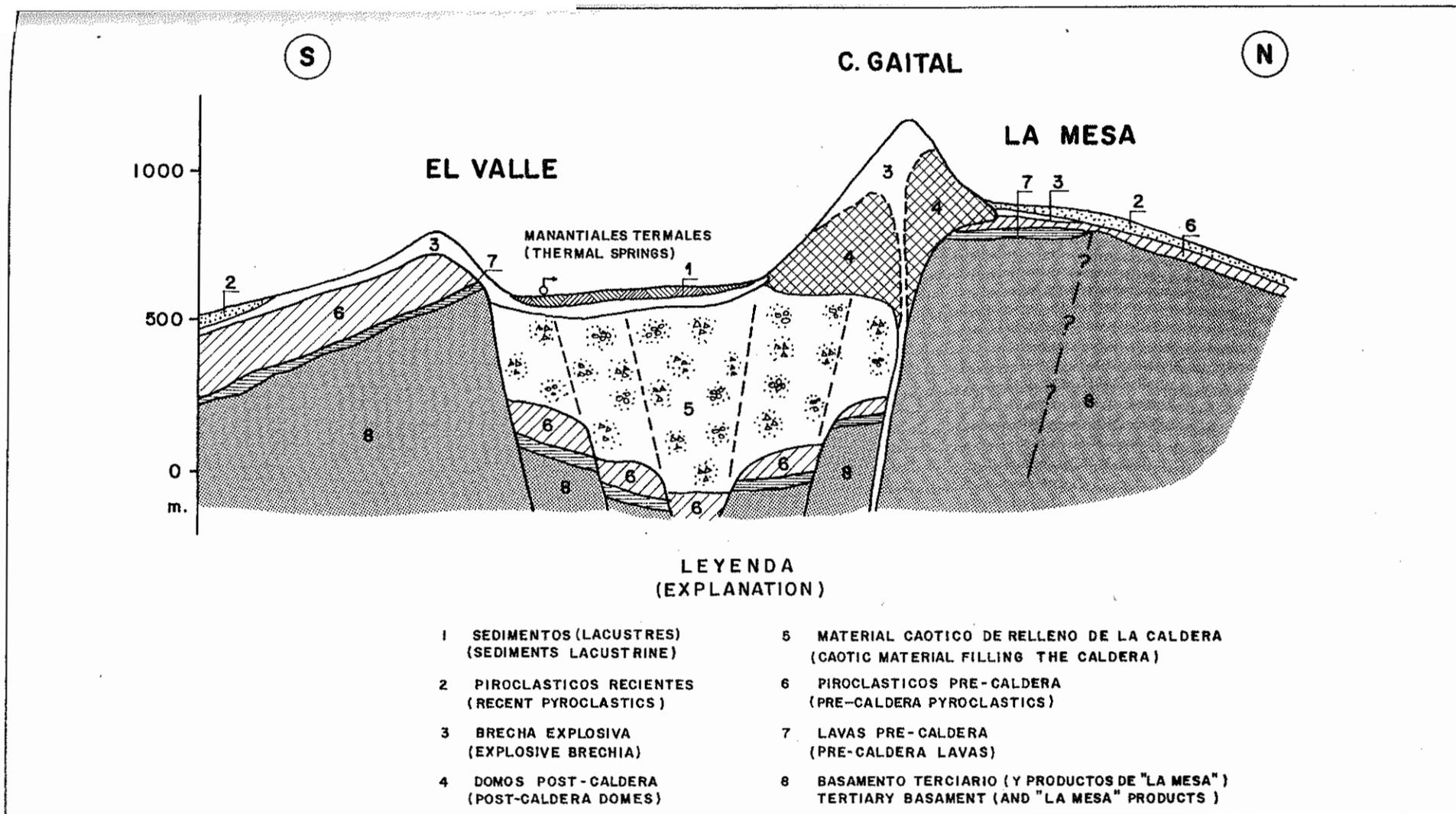


FIG. 6 CORTE GEOLOGICO DEL EDIFICIO EL VALLE DE ANTON
(GEOLOGICAL CROSS SECTION OF THE EL VALLE DE ANTON STRUCTURE)

4.4.2 Hidrogeología

Los principales resultados alcanzados en el estudio hidrogeológico de El Valle de Antón se sintetizan a continuación:

Los piroclastos son en general depósitos con propiedades hidrodinámicas interesantes, mucho más que las coladas antiguas muy compactas que pueden constituir el basamento. Sin embargo en el clima tropical, caliente y húmedo, la alteración es muy importante; se trata de argilitización que disminuye la permeabilidad de las formaciones y es capaz de formar capas impermeables. La erosión y acumulación de sedimentos heterogéneos produce una sucesión de acuíferos y capas impermeables de poca profundidad y sin relación directa con el eventual acuífero geotérmico.

Si la meteorización juega un papel desfavorable en los procesos de infiltración y formación de acuíferos, por el contrario la fracturación muy importante, asociada a la formación de estructuras (calderas, domos) aumenta la porosidad y la permeabilidad de las formaciones. Esta fisuración se encuentra tanto en los domos y coladas antiguas como en los piroclastos, sobre todo dentro y cerca de la caldera. Como están subverticales estas fisuras forman ejes de drenaje preferenciales. En el fondo de la caldera, se encuentra a unos 60 metros de profundidad un acuífero confinado con agua termal (40 °C) aislado de la superficie por una capa dura impermeable.

Se encuentran durante las perforaciones sedimentos lacustres que dan la prueba de la existencia de un lago dentro de la caldera. No se conoce exactamente la extensión de este acuífero pero parece limitado a la parte sur de la caldera y que existe cerca de los domos.

En la Figura No. 7 está indicada la ubicación de los pozos principales (someros) del área de El Valle, y la zona donde se concentran los pozos con comportamiento artesiano. Las presiones encontradas en el fondo de estos pozos son de 6 a 7 bares (un poco mayor de la debida a su profundidad). La zona de recarga de este acuífero se encuentra probablemente en los piedemontes de los domos (Figura No. 8).

Mucho más fácil resulta estimar la infiltración más profunda, es decir la recarga de los eventuales acuíferos profundos. Sin embargo, el estudio del balance hidrológico preliminar ha dado elementos favorables para deducir la presencia de acuíferos profundos y de fenómenos de infiltración y recarga.

Un caudal mínimo de 600 l/s en el río Antón, en la estación seca, es la prueba de la existencia de acuíferos que sostienen el caudal aún cuando no hay lluvia.

Existe también una infiltración más profunda que no reaparece en el río Antón dentro de la caldera. En efecto, el balance hidrológico se puede escribir de la siguiente manera:

$$P = ETR + Qs + Qr + I$$

$$3.500 = 800 + 1.460 + 760 + 480 \text{ (en milímetros de agua)}$$

P precipitación
ETR evapotranspiración
Qs escorrentía superficial
Qr flujo subterráneo
I infiltración

La infiltración profunda representaría así sobre el área de El Valle un caudal medio anual de 350 l/s.

La Figura No. 9 resume las propiedades hidrodinámicas de las formaciones superficiales de El Valle: El 35% de la lluvia transita por los acuíferos y si la mayoría queda solo en los acuíferos superficiales y sostiene el caudal del río (caudal subterráneo más o menos regular de unos 700 l/s, una pequeña proporción, el 15% de la lluvia, parece infiltrarse más profundamente. Hay que subrayar, sin embargo, que la relativa incertidumbre sobre los parámetros hidroclimáticos no permite obtener una simulación perfecta ni tener una gran confianza en estos valores.

Un error de 10% sobre los diferentes parámetros podría ser suficiente para dejar un nuevo balance de agua con una infiltración profunda escasa o nula.

4.4.3 Geoquímica

Las investigaciones geoquímicas en el área de El Valle de Antón han sido realizadas en dos distintas fases. La primera fue realizada de octubre 1984 a enero 1985; la segunda en diciembre 1986. En la segunda fase fueron muestreados varios puntos ya analizados en la primera etapa y fueron también recolectadas muestras de puntos de agua no considerados anteriormente. En abril 1986 se recolectaron también tres muestras de gases. Los datos incluyen: análisis químico de aguas (parte de los cuales fueron repetidos en los laboratorios del IIE-México y de los Alamos, New Mexico-USA), análisis químicos de tres gases y algunos análisis isotópicos.

Todas las aguas someras recolectadas, exceptuando dos muestras procedentes de un único punto de muestreo, tienen composición bicarbonato-alcalino térrea-alcalina y constituyen una clase bastante homogénea desde el punto de vista de los caracteres físicos y químicos ($T = 21$ a 26°C , TDS generalmente menor que 3 meq/l).

En las aguas someras de la región no se encuentran anomalías de boro ni de amoníaco, solamente se identifican unas anomalías de temperatura y de presión parcial de anhídrido carbónico, sin

correspondencia puntual; hace excepción la muestra 30 (un pozo ubicado 5 km al oeste de San Carlos) que es un punto aislado, pero anómalo ya sea en temperatura o en anhídrido carbónico.

Entre las aguas termales se pueden distinguir tres grupos:

- a. Las aguas cloruro-sulfato-alcálinas de Chiguirí Abajo (aproximadamente 20 km al noroeste de El Valle) con $T= 29$ a 33°C , TDS de aproximadamente 260 meq/l, alta $p\text{CO}_2$ y temperatura geoquímica de 65 a 70°C .
- b. Las aguas cloruro-alcálinas de la cuenca de El Valle ($T= 29$ a 39°C , TDS= 14 a 70 meq/l, alta $p\text{CO}_2$) con temperatura geoquímica de 75 a 80°C .
- c. El agua cloruro-alcálico-alcálico-térrica de El Salado (aproximadamente 20 km al este de El Valle), con $T=38$ a 39°C , TDS = 155 meq/l, $p\text{CO}_2$ de 0,0008 atm (sólo 0,25 veces mayor que el valor atmosférico) y temperatura geoquímica de 110 a 120°C . Esta última agua termal, que es la única pobre en Mg, tiene correspondientemente, una temperatura geoquímica más alta. Cabe notar que la ausencia de anomalías de boro está de acuerdo con los valores relativamente bajos de las temperaturas geoquímicas.

Las temperaturas geoquímicas indicadas por la composición de los gases son de aproximadamente 150°C en el Valle y de 120°C en Chiguirí. En El Salado hay coincidencia entre la temperatura geoquímica de los gases y la temperatura hidrogeoquímica, mientras en El Valle y en Chiguirí la primera es mayor que la segunda; es posible que la primera esté relacionada a un acuífero más profundo, en ambas localidades.

Los datos de la segunda campaña de muestreo no evidencian cambios de temperatura, composición y salinidad seguramente significativos en las fuentes termales objeto de doble muestreo. Cabe notar que la variación de temperatura observada a Chiguirí es de 2°C a 3°C .

En la cuenca de El Valle, durante la segunda campaña, fueron muestreados por primera vez unos puntos (fuentes y pozos perforados) y se hicieron medidas de conductividad eléctrica y temperatura en otros pozos artesianos perforados, estos datos permiten limitar la zona de subida e infiltración lateral del agua termal.

Las indicaciones geoquímicas no parecen negativas si se consideran dentro del contexto hidrogeológico de la región estudiada, donde los importantes flujos de agua meteórica afectan no solamente los acuíferos someros, sino también los acuíferos relativamente profundos (ver Figura No. 8). Además esta influencia de las aguas meteóricas es particularmente importante en las áreas, como la cuenca de El Valle, que representan verdaderas zonas de recarga. Por lo tanto, ya el hecho de encontrar fuentes termales en la cuenca de El Valle, nos parece una indicación positiva.

La baja temperatura geoquímica y el "bajo" contenido salino de las aguas termales, junto con la falta de anomalías de boro permite suponer que estas aguas termales provienen desde un acuífero relativamente poco profundo. La correlación entre la temperatura del agua producida por los pozos perforados artesianos (corregida por la contribución termal convectiva, donde es necesario) y la profundidad de los pozos mismos sugiere que la profundidad de este acuífero termal es mayor que 550-600 m y menor que 1 100-1 200 m. Este acuífero termal poco profundo está alimentado, muy probablemente, por una componente termal (que sube desde niveles más profundos) y una componente meteórica; las dos se mezclan, la mezcla se reequilibra en condiciones de baja temperatura y la componente termal pierde así toda la memoria de las condiciones originales; solo los gases llevan una huella de las condiciones de temperatura más alta existente a mayor profundidad.

Las otras dos aguas termales, que se encuentran 20 km al noroeste y 20 km al este de la cuenca de El Valle, podrían representar descargas marginales desde un sistema geotérmico ubicado bajo de la misma cuenca de "El Valle"; en este contexto, los bajos valores de temperatura geoquímica, no parecen por lo tanto negativos.

4.4.4 Geofísica

Las investigaciones geofísicas han consistido en la ejecución de 42 sondeos geoelectrónicos (SE) y de 225 estaciones gravimétricas. La interpretación de los sondeos eléctricos ha permitido diferenciar los siguientes tres conjuntos, desde arriba hacia abajo:

- a. Un conjunto resistivo de espesor variable hasta un máximo de 400-500 m, al interior del cual está alojado el acuífero superior.
- b. Un conjunto conductivo eléctricamente muy homogéneo, con algunas heterogeneidades locales a pequeña escala; globalmente debería constituir un ambiente de permeabilidad baja o nula (aunque localmente permeable).
- c. Por fin un basamento resistivo que podría estar constituido por lavas precaldera o también por productos postcaldera pero profundamente afectado por alteración hidrotermal de elevada temperatura (por ejemplo: facies propilítica o equivalente).

El techo de este basamento resistivo no ha sido alcanzado en ninguno de los sondeos eléctricos, cuya longitud eléctrica AB ha sido a veces limitada por dificultades topográficas. Para los sondeos eléctricos de este tipo se ha decidido la extrapolación de las curvas tomando en cuenta los otros diagramas y los ábacos teóricos para definir la profundidad mínima de dicho basamento.

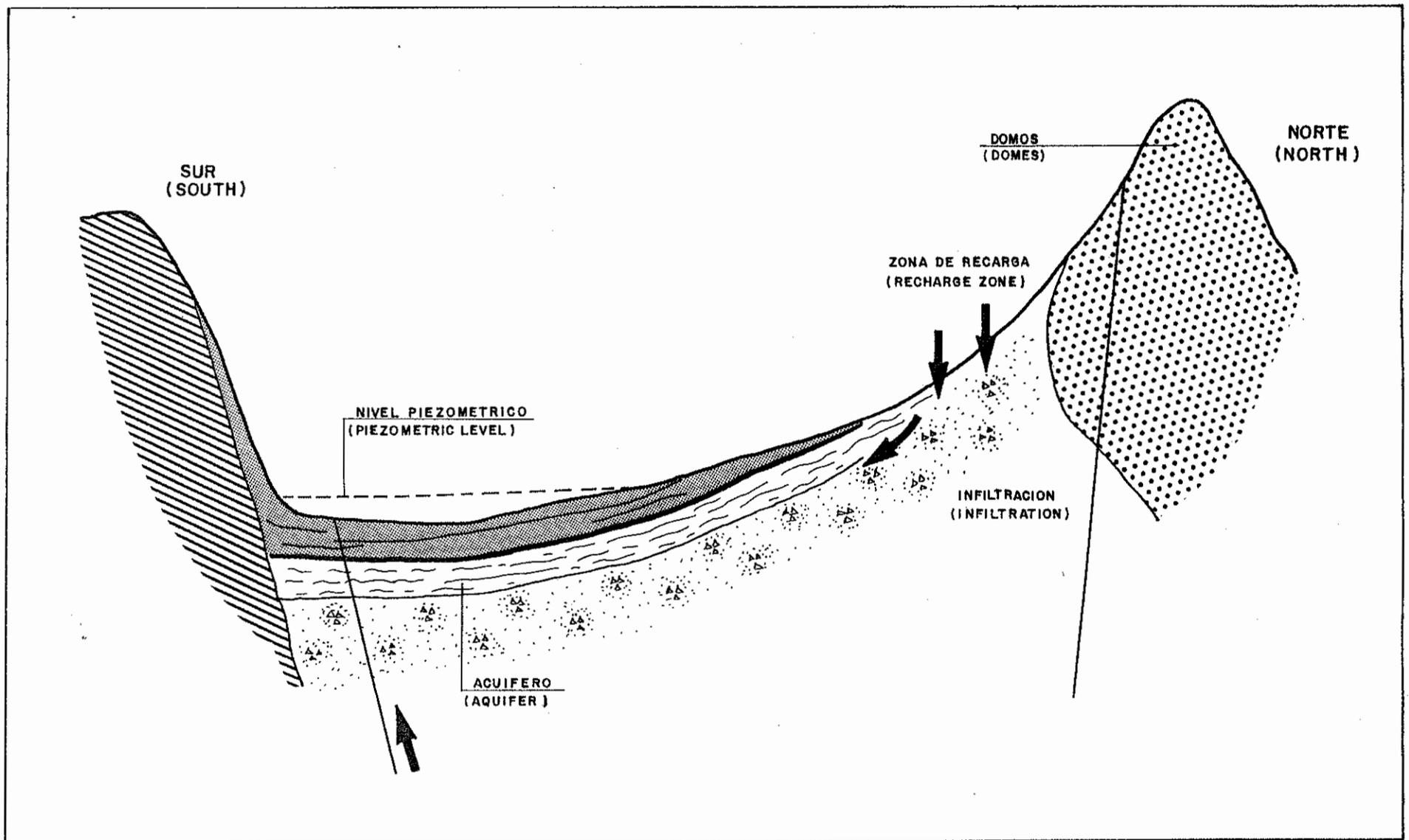


FIG. 8 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA ALIMENTACION DE LOS POZOS ARTESIANOS EN EL VALLE
 (FEEDING SYSTEM OF THE ARTESIAN WELLS AT EL VALLE. SCHEMATIC REPRESENTATION)

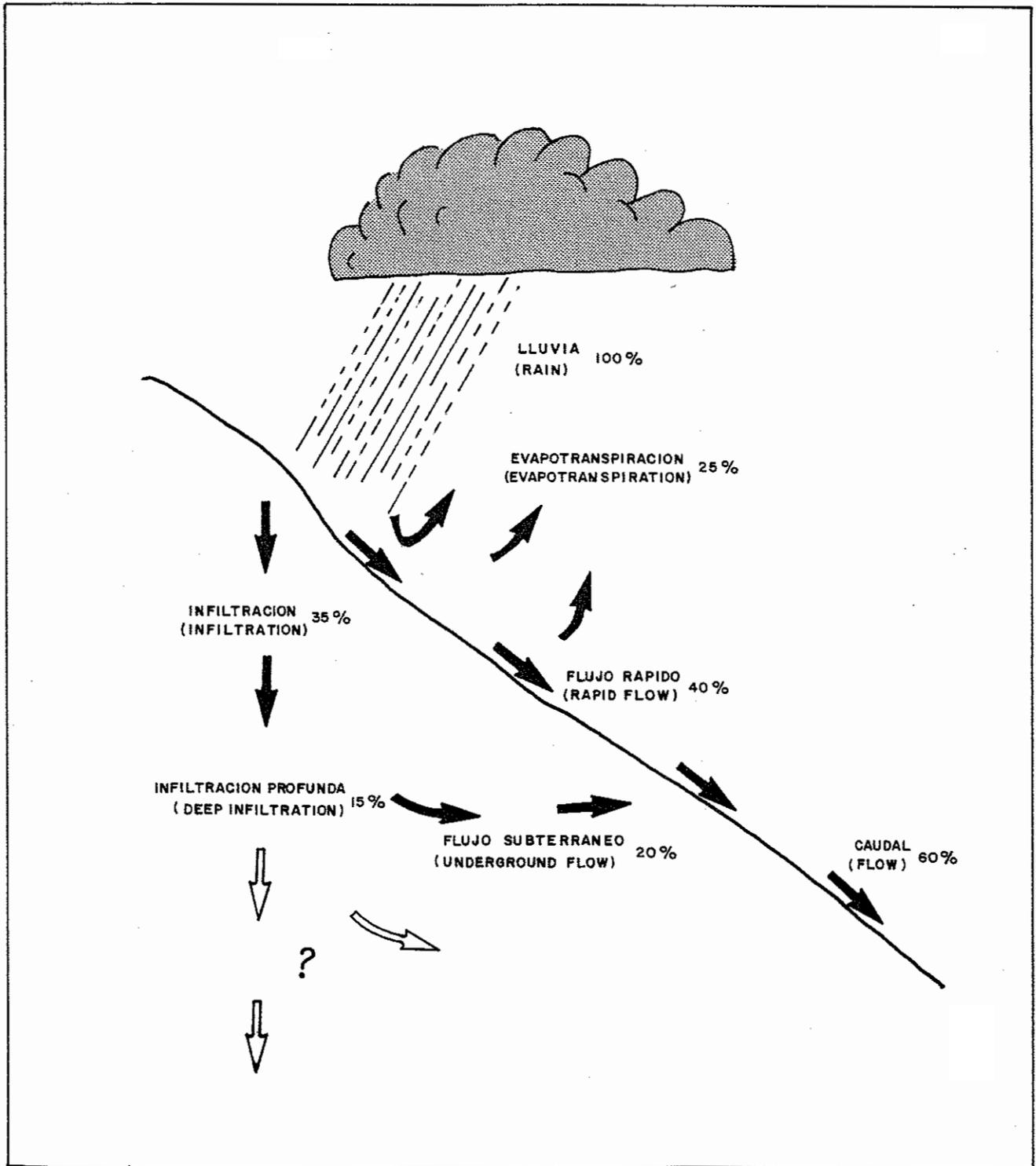


FIG.9 ESQUEMA DEL BALANCE DE AGUA EN EL VALLE DE ANTON
(AREA DEL DRENAJE AGUA ARRIBA DEL RIO ANTON)

WATER SCHEMATIC BALANCE AT THE VALLE DE ANTON
(DRAINAGE AREA UPSTREAM ANTON RIVER)

Este procedimiento ha resultado plenamente justificado a la luz de las informaciones cuantitativas proporcionadas por la gravimetría.

La interpretación cuantitativa de la gravimetría ha sido ejecutada a partir del mapa de las anomalías de Bouguer ($d= 2,2$) tomando en consideración las pocas diferencias observadas en los mapas de las anomalías residuales. La inversión de los perfiles gravimétricos ha sido realizada según los criterios siguientes:

- a. Utilización del modelo cuantitativo definitivo en base a los datos geoelectricos, es decir un modelo con tres conjuntos. El espesor del primer conjunto, generalmente bien definido por la geoelectrica, ha sido conservado en el cálculo gravimétrico.
- b. En consideración a las hipótesis adelantadas en base a los valores de resistividad sobre la naturaleza litológica de los tres diferentes conjuntos, los siguientes contrastes de densidad se han adoptado: siendo "d" la densidad del conjunto 1 (resistivo superficial), el conjunto 2 (conductivo) tendría una densidad "d -0,2" mientras que la densidad del conjunto 3 (basamento resistivo) sería de "d +0,4".

La interpretación cuantitativa de la gravimetría obtenida a través de este procedimiento es en general concordante con la proporcionada por los sondeos geoelectricos y ha permitido precisar la profundidad del basamento resistivo, en particular en los puntos donde éste no había sido alcanzado por los sondeos eléctricos.

- Resultados geofísicos

Los resultados del estudio geofísico ponen en evidencia dos dominios muy diferentes:

- a. Uno al sur de los 3 domos centrales, donde se observa una importante depresión con eje E-O, que afecta el techo del basamento y cuyo punto bajo se ubica en las cercanías del lugar "El Valle" a más de 1 200 m de profundidad. En este sector los depósitos conductores y menos densos (conjunto 2) son los más desarrollados. El gradiente elevado de los bordes de esta depresión, sugiere la existencia de accidentes tectónicos relativamente importantes que hacen subir el resistivo de base en dirección de los bordes, en particular hacia sur y oeste. Una interpretación esquemática según dos cortes N-S y O-E está indicada en la Figura No. 10.
- b. El otro, al norte de los domos donde los niveles identificados por la geofísica son sin lugar a duda diferentes con respecto a los observados al sur. La potente formación conductora aquí desaparece y se encuentran formaciones resistivas o mediamente resistivas desde la superficie hasta el fondo. Esto parece indicar que las formaciones de

base (lavas precaldera; basamento volcánico terciario) están aquí muy cerca de la superficie. Es difícil establecer si se trata de las mismas que se encuentran al sur de los domos. La gravimetría pone en evidencia el contacto norte de los domos: un fuerte espesor de una formación relativamente poco densa pero con elevada resistividad que se reduce en el borde septentrional de La Mesa (Figura No. 10).

En conjunto hay una muy buena concordancia entre los datos geofísicos y la interpretación de la estructura del edificio de El Valle que resulta de los estudios geovulcanológicos. La estructura de El Valle está constituida por dos calderas (Figura No. 6); la más septentrional (La Mesa) es la más antigua siendo cortada por la de El Valle y corresponde a un colapso muy limitado como es sugerido por la topografía y el escaso volumen de los productos emitidos. Los domos que limitan las dos estructuras en superficie, se han emplazado a lo largo de una fractura anular coincidente con el borde de la caldera de El Valle, en una fase de actividad probablemente inmediatamente sucesiva al colapso.

Los datos geofísicos indican en efecto que solo la parte meridional, al sur de los domos, correspondiente a la depresión de El Valle, tiene una estructura colapsada con geometría típicamente caldérica. El contraste de propiedades físicas entre la zona norte y la del sur confirma que los domos lávicos dividen dos dominios diferentes, que son probablemente muy distintos también hidrológicamente.

4.4.5 Evaluación geotérmica

El conjunto de datos obtenidos permite formular el siguiente modelo geotérmico preliminar del área del Valle de Antón:

a. Anomalía térmica

El volcán El Valle de Antón posee las siguientes características que indican cómo la cámara magmática que ha alimentado su actividad puede ser considerada una buena fuente de calor:

- Una historia volcánica articulada y compleja de larga duración (por lo menos 1,5 Ma) caracterizada por numerosas fases eruptivas evolucionadas con carácter predominantemente explosivo.
- La naturaleza de los productos emitidos que constituyen una serie continua con afinidad calcoalcalina de andesita a riolita producida por procesos de diferenciación por cristalización fraccionada en una cámara magmática somera.

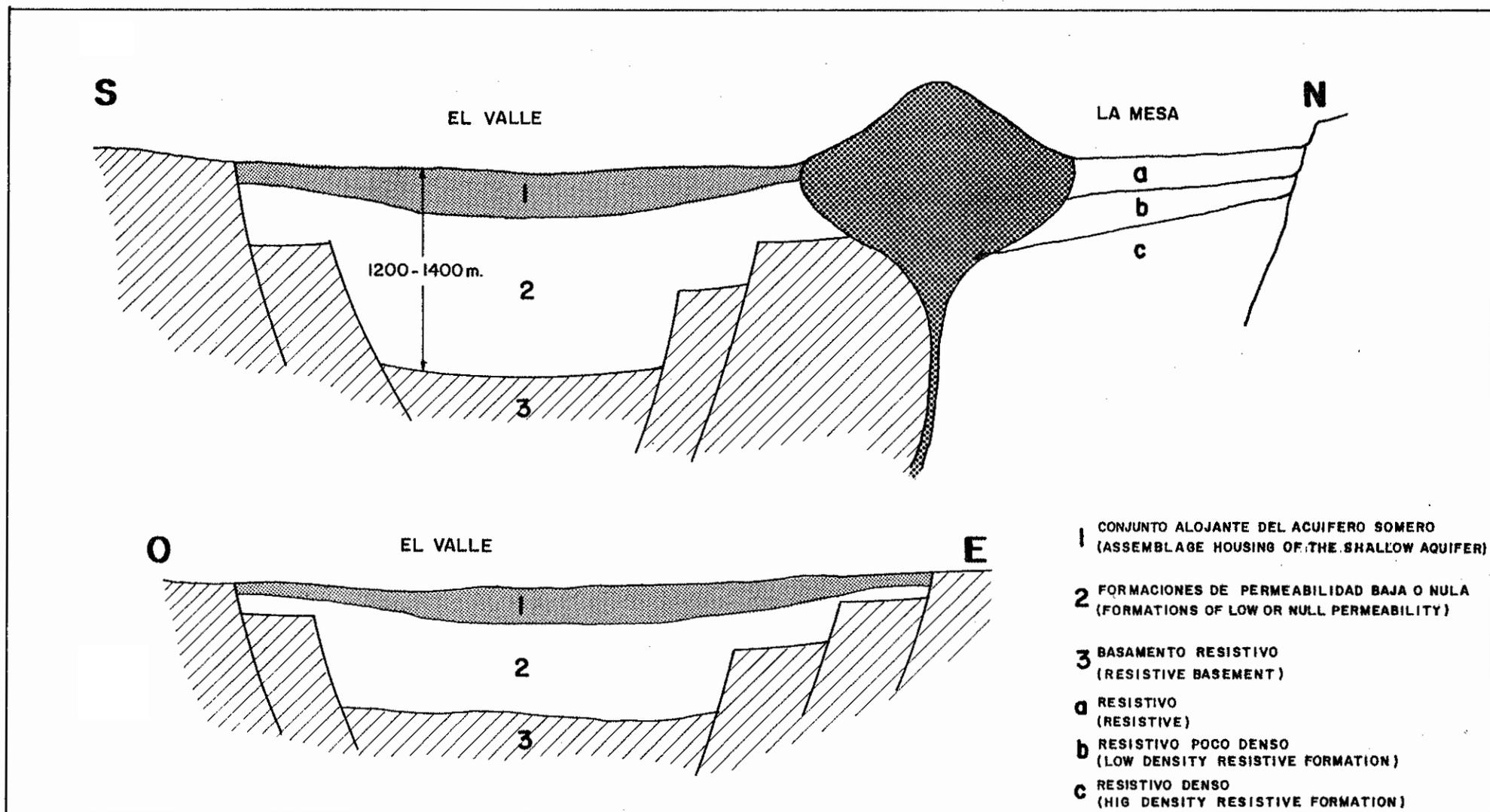


FIG. 10 INTERPRETACION ESQUEMATICA DE LA ESTRUCTURA PROFUNDA EN EL VALLE DE ANTON SEGUN CORTES N-S Y O-E
(DEEP STRUCTURE SCHEMATIC INTERPRETATION OF THE EL VALLE DE ANTON N-S AND W-E CROSS SECTION)

- La ocurrencia de estructuras caldéricas de colapso, la principal de las cuales es coincidente con la depresión morfológica de El Valle correspondiente a una cámara magmática somera a unos 3 a 5 km de profundidad, según los datos de geobarometría mineralógica.
- Una reactivación importante de la actividad volcánica después del colapso caldérico marcada por el emplazamiento de domos y sobre todo por las grandes erupciones explosivas de Río Mar, Mata Ahogado, etc.
- Edad muy reciente de la última actividad eruptiva, menos de 34 600 años; en cuanto a esta edad, el 14 C caracteriza un depósito piroclástico cubierto por otro (s).
- El volumen mínimo de la cámara magmática puede ser calculado en cerca de 27 kilómetros cúbicos considerando que el líquido riolítico expulsado, estimado en relación al colapso caldérico, representa el 44% en peso del magma andesítico primario.

b. Condiciones hidrogeológicas

Las características de permeabilidad de las formaciones aflorantes presentan indicios favorables, sobre todo gracias a la intensa actividad tectónica y volcanotectónica (formación de calderas).

Las formaciones masivas (lávicas en particular) del basamento volcánico terciario y del antiguo edificio de El Valle tienen una permeabilidad secundaria relacionada con una intensa fracturación subvertical; las fisuras subverticales aparecen como ejes de drenaje preferencial.

Los piroclásticos que constituyen la gran parte del volcán El Valle tienen buenas propiedades hidrodinámicas; los depósitos antiguos (argilitizados y sellados), y los recientes (soldados), tienen permeabilidad secundaria por fisuración, mientras los recientes suelos, aparte de los paleosuelos que pueden aislar los acuíferos, son permeables por porosidad.

Muy importante parece el papel jugado por los domos, en particular los alineados E-O: Cerro Pajita, Cerro Gaital y Cerro Caracoral. Siendo afectados por una fisuración vertical muy intensa son probablemente ejes preferenciales de infiltración profunda para las aguas meteóricas a lo largo de sus conductos de alimentación que están ubicados en una zona de importante debilidad estructural.

La modelización del balance hidrogeológico preliminar, según el estudio hidrogeológico, ofrece también elementos favorables a la presencia de acuíferos profundos en cuanto se estima que la infiltración profunda media anual es de 350 l/s sobre el área de El Valle.

Hay que recordar además cómo la intensa intemperización y consecuente argilitización de las rocas en esta área (con formación de paleosuelos muy potentes) podrían constituir capas impermeables muy eficaces. La existencia de una capa sello está indicada, en efecto, por el hecho de que los xenolitos líticos de las secuencias piroclásticas están en general argilificados, ésto está confirmado por los resultados geoelectrónicos que han revelado la presencia de un conjunto conductivo. El conjunto de todos los datos sugieren las conclusiones siguientes:

- a. La zona meridional, al sur de los domos, es la que presenta las principales atracciones desde el punto de vista geotérmico. Esta zona está caracterizada por la presencia de un acuífero somero y una cobertura impermeable con máximo espesor de alrededor 1 000 m al centro de la estructura.
- b. La zona al norte de los domos no presenta evidencias de actividad hidrotermal; tiene el basamento muy cercano a la superficie y parece en conjunto menos interesante.
- c. El máximo espesor del nivel permeable superficial alcanza los 400-500 m en la parte central de la caldera de El Valle. Un pozo que atravesase totalmente este nivel penetrando en un centenar de metros la formación conductiva (profundidad de cerca 600 m) debería permitir una medida confiable del gradiente térmico que podría ser extrapolado hasta el techo del resistivo basal. Se confirma, por lo tanto, la gran utilidad del pozo exploratorio recomendado por la Junta Asesora del Proyecto, en su tercera reunión (Informe No. 23).
- d. La confirmación geofísica de la existencia de un nivel superficial permeable que aloja una importante circulación somera de agua meteórica fría, aumenta la importancia de los indicios geoquímicos, confirmando el potencial interés geotérmico del área.

4.5 Barú-Colorado

4.5.1 Introducción

El programa IRHE-BID-OLADE establecido en 1983, tenía como objetivo principal la realización de los siguientes estudios:

- a. Reconocimiento Geotérmico Nacional de la República de Panamá.
- b. Estudio del Complejo Barú-Colorado.

El programa inicial del Estudio del Complejo Barú-Colorado preveía la realización de investigaciones de campo y de laboratorio enfocadas a la definición del modelo geotérmico de la zona y de

los trabajos a desarrollarse en una eventual fase posterior, esto es, la factibilidad. La realización de estas investigaciones estaba programada en dos fases consecutivas de trabajo:

- a. Una primera fase con estudios geovulcanológicos, hidrogeológicos y geoquímicos.
- b. Una segunda fase que incluía: estudios geofísicos a realizarse en las zonas mas prometedoras identificadas en base a los resultados de la primera fase, perforaciones someras, estudios de microsismicidad, evaluación de la capacidad energética del reservorio, interpretación geotérmica y estimación del costo del probable desarrollo geotérmico.

Los resultados obtenidos al final de los trabajos de campo de la primera fase, en diciembre de 1984, crearon algunas dudas en cuanto a la existencia de reservorios geotérmicos de alta entalpía en la zona de estudio y la Junta Asesora del proyecto, en su segunda Reunión realizada en marzo de 1985, recomendó suspender parte de los trabajos exploratorios de la segunda fase en espera de los datos del laboratorio geoquímico. Estos datos, y los resultados del estudio hidrogeológico (Informe No. 10, agosto 1985), confirmaron que el complejo Barú-Colorado presentaba un nivel de riesgo muy elevado desde el punto de vista de la explotación geotérmica.

Considerando que los resultados del contemporáneo Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional indicaban la existencia en el país de otras zonas más prometedoras como el Valle de Antón y subordinadamente Chitra Calobre, fue decidido, según lo recomendado por la Junta Asesora en su Tercera Reunión efectuada en abril de 1986, suspender todas las actividades en el área de Barú-Colorado, transfiriendo las investigaciones originariamente previstas en las fases avanzadas del Estudio del Complejo Barú-Colorado a las zonas mas prometedoras identificadas en el Reconocimiento Geotérmico Nacional.

El presente informe sintetiza los resultados de los trabajos efectuados antes de la suspensión del estudio y representan la base técnica que justifica el cambio de programa.

- Objetivos

- a. El estudio se llevó a cabo con el objeto de definir, a nivel avanzado, la viabilidad de explotación del complejo volcánico Barú-Colorado en la República de Panamá.
- b. El objetivo final del estudio era el de incorporar el recurso geotérmico de Barú-Colorado a la oferta energética de la República de Panamá para, complementariamente con la hidroelectricidad, permitir la sustitución del petróleo en la generación eléctrica.

- c. Con la realización del estudio se buscó adiestrar a los técnicos del IRHE que participaron en el mismo, en las técnicas de la exploración geotérmica.

- Antecedentes

En el año 1971, el Gobierno de Panamá inició los estudios de las manifestaciones geotérmicas del territorio nacional y, tras una serie de consultas realizadas con diversos científicos, se seleccionó el área de Cerro Pando para comenzar los estudios sistemáticos, que incluyeron también algunas perforaciones exploratorias. Sin embargo, las investigaciones realizadas carecieron de un esquema metodológico coherente y, sobre todo, se centraron en el estudio de las manifestaciones termales y sus características geoquímicas, dejando un poco de lado los aspectos volcanológicos, geológicos y estructurales a nivel regional. Ello conducía a una sucesión de informes que con sus recomendaciones desencadenaban nuevos estudios e informes en los que no se llegaba a dilucidar la existencia de un campo geotérmico.

Esta situación subsistió hasta el año 1981 en que fue suscrito un Convenio de Cooperación Técnica entre OLADE y el IRHE, marcándose así el comienzo de una nueva etapa en las investigaciones geotérmicas, con la realización de una revisión crítica de todos los datos existentes y de estudios geovolcanológicos de campo a nivel de reconocimiento. Las conclusiones obtenidas fueron:

a. Fuente de calor

Hay una anomalía térmica inducida por la presencia de aparatos volcánicos complejos con colapso caldérico, reactivación con emisión de grandes cantidades de productos magmáticos evolucionados y, por tanto, la fuente de calor parece asegurada.

b. Reservorio

La presencia de un basamento impermeable a cotas muy altas, limita fuertemente la perspectiva areal del desarrollo geotérmico en la zona.

Los potenciales reservorios geotérmicos solo pueden estar emplazados en el interior de las rocas volcánicas pliocuaternarias, si éstas son lo suficientemente potentes, y esto se vería favorecido en el interior de las depresiones caldéricas. Además se considera posible, a causa de la falta de una cobertura eficaz, el enfriamiento de los complejos volcánicos por una abundante infiltración de agua fría.

- c. La conclusión final es que la zona volcánica de Chiriquí presenta numerosos indicios favorables para la presencia de campos geotérmicos de alta entalpía en el interior de las calderas de Barú-Colorado. A causa de la ausencia de datos específicos sobre estas dos zonas y de la presencia de un

cuadro hidrogeológico complejo, existe una buena probabilidad, pero no certeza, de encontrar acuíferos a temperaturas suficientemente elevadas en el subsuelo de las calderas. Se limita la posibilidad en el exterior debido a un basamento que se considera impermeable y somero.

Se recomendó continuar con los estudios, concentrando los esfuerzos en el interior de las calderas ya mencionadas. Específicamente fue recomendado lo siguiente:

- a. Verificación de la anomalía térmica ligada a los dos aparatos volcánicos Colorado y Barú.
- b. Verificación de la existencia de acuíferos calientes confinados en el interior de la serie lávica de relleno de las calderas de los dos volcanes.
- c. Verificación de la existencia, en el interior de la misma serie volcánica, de horizontes impermeables suficientemente espesos, capaces de representar una cobertura eficaz para los acuíferos profundos.

Las recomendaciones expuestas fueron totalmente incorporadas en el programa IRHE-BID-OLADE y aprobadas por la Junta Asesora del Proyecto Geotérmico de Panamá (Informe de la Primera Reunión, Septiembre 1983) y se dió principio, en la segunda mitad de 1984, a la primera fase del estudio del Complejo Barú-Colorado.

- Organización del trabajo y personal

Los estudios de campo y laboratorio fueron realizados por un grupo de expertos contratados por OLADE, quienes trabajaron en estrecha cooperación con los técnicos del IRHE y bajo la supervisión de OLADE. El personal técnico involucrado en el estudio fue el siguiente:

| <u>Area</u> | <u>Expertos OLADE</u> | <u>Técnicos IRHE</u> |
|--------------------|------------------------------------|---|
| Geovulcanología | Valerio Arnó Alfonso Bernardini | Luis Palma Ovidio Fábrega Emérito Marquinez |
| Petrología | Fabrizio Innocenti | |
| Hidrogeología | Evelio Ferreiro | Ovidio Fábrega |
| Geoquímica | Luigi Marini Elizabeth Mayen | Ariel Madrid Francisco Ponce |
| Geofísica (Asesor) | Howard Ross | |

La coordinación de las actividades y trabajos fue asegurada por OLADE, mediante la participación de los funcionarios Gustavo Cuellar, Eduardo Aguilera y Jorge Guiza. El Jefe del Proyecto, Ing. Arturo Ramírez, coordinó las actividades profesionales del personal del IRHE y aseguró el apoyo logístico a los trabajos.

Los trabajos analíticos fueron ejecutados, bajo contrato con IRHE, por los siguientes laboratorios:

- a. BRGM (Francia): análisis químicos de rocas
- b. ZETA Analytica (Suiza): dataciones radiométricas K/Ar.
- c. IIE (México): análisis químicos de aguas
- d. Geotérmica Italiana (Italia): análisis químicos de gases.

- Metodología

La metodología utilizada en el estudio fue aquella estructurada por OLADE (Documento No. 1, 1978) a la que se le adicionaron, en principio, estudios de microsismicidad. Esta metodología se refiere de manera específica a la búsqueda de campos geotérmicos de alta entalpía en una región volcánica.

Esta metodología no es un esquema rígido, sino que en ella misma esta explícito un cierto grado de flexibilidad para poder adaptarla a las diferentes condiciones de las distintas áreas y a las particularidades inherentes de un determinado proyecto geotérmico.

La metodología de exploración de OLADE se inspira en un modelo general de campo geotérmico, conforme fue explicado en el numeral 2.4 del presente informe. El modelo geotérmico de una área se define cuando existe disponibilidad de información detallada referente a:

- a. La presencia y origen de las anomalías térmicas.
- b. Las características de las formaciones de cobertura o capa sello.
- c. El modelo de circulación general del agua en el subsuelo.
- d. El tipo y las características del reservorio.

Un modelo tridimensional de esta naturaleza permitirá planificar un adecuado programa de perforaciones profundas, dirigido a comprobar la validez de dicho modelo y a evaluar el potencial del campo.

. Metodología geovulcanológica

Conforme con la metodología OLADE, los siguientes estudios han sido realizados en el área del complejo volcánico de Barú-Colorado:

- a. Evaluación de la fuente de calor (cámara magmática) mediante la reconstrucción de la evolución magmática y vulcanológica determinándose en cada caso la edad, tipo de emisión, composición química y volumen de los productos volcánicos. Posteriormente se realizan estudios petrológicos para estimar la profundidad, temperatura y tamaño de la cámara magmática.
- b. Evaluación de la posibilidad de existencia de acuíferos calientes, confinados en el interior de las series lávicas, mediante el estudio litoestratigráfico del complejo volcánico y muestreando en niveles piroclásticos fragmentos de rocas alteradas hidrotermalmente.

Estos estudios comprendieron trabajos de campo, laboratorio y de interpretación según las normas establecidas en los Términos de Referencia del Proyecto.

. Metodología hidrogeológica

Además de los criterios metodológicos generales ya descritos en el punto 2.4, el estudio hidrogeológico del complejo Barú-Colorado ha sido abordado para cada una de las grandes unidades geológicas atendiendo a los siguientes aspectos y objetivos:

- a. Factores litoestratigráficos que determinan sus propiedades físicas.
- b. Factores tectónicos que las pueden modificar y fijar sus dimensiones y geometría.

Factores litoestratigráficos

- i. Características litológicas primarias. El registro de ellas permite evaluar la permeabilidad de la roca en función de sus rasgos primarios, o sea, los propios del material en el momento de su emplazamiento. Para los depósitos fragmentarios se han evaluado las propiedades directamente relacionadas con su porosidad y permeabilidad como son: tamaño de los clastos, uniformidad en el tamaño (distribución granulométrica) y grado de cementación. Para las lavas se ha evaluado su grado de fisuración primaria que controla la permeabilidad vertical y la proporción de materiales escoriáceos en la base y techo de las coladas que influyen en la permeabilidad horizontal.

- ii. Características litológicas secundarias. Son aquellos rasgos adquiridos por las rocas con posterioridad a su emplazamiento y pueden modificar sustancialmente las propiedades hidrogeológicas de la roca. Entre ellas se incluyen: grado de compactación, alteración hidrotermal, meteorización por intemperismo y desarrollo de suelos.

Factores tectónicos

- i. Marco tectónico regional. Permite situar los accidentes tectónicos mayores que afectan "a posteriori" a los materiales, distorsionando su distribución en sentido horizontal y vertical, al mismo tiempo que pueden alterar las interrelaciones entre los distintos acuíferos, confinar acuíferos libres, etc.
- ii. Tectónica local. Este punto es de suma importancia pues puede cambiar drásticamente las propiedades hidrogeológicas del basamento, haciendo que materiales con una permeabilidad inicial baja, la aumenten por el desarrollo de fisuración inducida por el fallamiento.

En particular, ha sido estudiado el diseño de la red de diaclasamiento intentando hallar una correlación entre esfuerzos tectónicos y régimen de fisuración.

De las diaclasas han sido analizados los rasgos que influyen en su permeabilidad como son: familias más abundantes, continuidad lateral y vertical, presencia o ausencia de rellenos y naturaleza de los mismos.

En cuanto a las fallas se ha tratado de discriminar entre las compresivas y distensivas ya que estas últimas suelen estar asociadas a un régimen de fisuración abierta que permite la infiltración, aunque, por otra parte son también conductos preferentes de circulación de fluidos hidrotermales que pueden sellar la roca.

La identificación de fallas recientes o activas es de gran interés, pues a diferencia de las antiguas, pueden no estar selladas por procesos hidrotermales y actuar como conductos de circulación activa de los fluidos.

Toda esta información es válida para la prospección del reservorio, así como para la identificación de las zonas de recarga y de las formaciones que pudieran constituir capa sello.

Cabe destacar que debido a la complejidad de las alteraciones hidrotermales, grado de meteorización climática, heterogeneidad litológica del basamento, así como a la falta de datos hidrológicos cuantitativos, no ha sido posible intentar establecer un balance hidrológico y el estudio hidrogeológico, conforme con las

recomendaciones de la Junta Asesora del IRHE (Segunda Reunión, Marzo 1985), ha tenido un carácter esencialmente cualitativo, proporcionando, sin embargo resultados muy útiles

. Metodología geoquímica

Las técnicas hidrogeoquímicas y de la geoquímica de los gases han sido aplicadas conforme a la metodología de OLADE (OLADE, 1978), las mismas que fueron descritas en el numeral 2.4.2 de este informe.

4.5.2 Síntesis de los estudios

El área objeto de estudio se encuentra situada en la porción occidental de la República de Panamá, Provincia de Chiriquí, cercana a la frontera Costarricense (Figura No. 2). Las coordenadas geográficas que delimitan la zona de interés son:

Latitud 8° 40' y 8° 55' N
Longitud 82° 30' y 82° 45' O

En ella se encuentran situados los complejos volcánicos de Barú y Colorado cuyas características evolutivas y de quimismo hacían pensar en la existencia de una anomalía térmica superficial dentro de la corteza terrestre que podría haber sido capaz de originar un campo geotérmico de interés industrial, si se llegaba a verificar la existencia de los restantes elementos componentes del campo. Se expondrán a continuación los resultados alcanzados en las diferentes investigaciones realizadas dentro del estudio.

- Geovulcanología

. Marco Geológico

El área estudiada se halla enclavada en las estribaciones suroccidentales de la Cordillera de Talamanca, que constituye, además de la divisora oceánica del país, el núcleo o basamento sobre el que se apoyan otras formaciones geológicas de carácter fundamentalmente volcánico.

El basamento consta de cuatro grandes unidades litoestratigráficas que se suceden de norte a sur en tránsito gradual, es decir, mediante imbricación de unos productos con otros, presentando la siguiente secuencia:

- a. En la Cordillera de Talamanca hay intrusiones de carácter múltiple (desde gabros hasta granodioritas).
- b. En las estribaciones altas predominan productos volcánicos proximales (lavas).

- c. En las estribaciones bajas afloran facies distales (aglomerados) del volcanismo.
- d. En el dominio costero existen rocas sedimentarias detríticas (areniscas y lutitas) en ocasiones penetradas por cuerpos ígneos subvolcánicos.

Sobre estos materiales se disponen, ya en el ámbito del área de estudio, productos volcánicos originados por la actividad plio-cuaternaria de varios centros de emisión, de los que nos interesan fundamentalmente el Colorado y el Barú. Resumiendo la sucesión litoestratigráfica del área, de más antiguo a más moderno es la siguiente:

- a. Basamento: Rocas volcánicas en facies proximales y distales, intruidas por cuerpos ígneos de composición variable.
- b. Productos volcánicos del Colorado: lavas, avalanchas de escombros, deslizamientos, domos y piroclastos.
- c. Productos volcánicos del Barú: lavas, avalanchas de escombros, deslizamientos, domos y flujos piroclásticos.

. Los volcanes cuaternarios

La parte occidental de la provincia de Chiriquí esta caracterizada por la presencia de grandes aparatos volcánicos complejos (Anexo No. 3), alineados según la dirección NO-SE, que presentan edades decrecientes hacia el sureste. Del noroccidente al sureste, estos aparatos volcánicos son: El Pando, el Complejo Colorado y el Complejo Barú.

El Colorado es un estrato volcán muy complejo, profundamente afectado por tectónica distensiva, deslizamientos y erosión. Los resultados de las dataciones radiométricas K-Ar indican que el volcán se formó en un intervalo temporal probablemente comprendido entre 1,7 y 1,2 Ma. Vale destacar que la edad 14 C de solo 1430 años se refiere a un depósito piroclástico sobre el Cerro Totuma procedente del volcán Barú.

La parte más antigua del edificio está constituida principalmente por lavas andesíticas, mientras los productos piroclásticos caracterizan las fases sucesivas de actividad del volcán.

El edificio Colorado está afectado en su parte central, por una depresión morfológica previamente interpretada como un colapso caldérico y ahora atribuida a la sobreposición de varios procesos: tectónica distensiva, explosión direccional (blast), deslizamientos y erosión. La actividad volcánica termina con el emplazamiento de domos de lava al interior de la depresión central, con escasos depósitos piroclásticos asociados.

La evolución magmática es limitada; las rocas analizadas definen una asociación calcoalcalina y la mayor parte de las lavas pertenecen al grupo de las andesitas. Las andesitas basálticas están relativamente bien representadas; sin embargo, la mayor parte de ellas cae en proximidad del límite clasificativo con las andesitas (contenido en SiO₂ comprendido entre 55 y 56%). La muestra más evolucionada es una dacita (SiO₂ = 64,5 %) Además, la muestra CHI 69 presenta afinidad shoshonítica (K₂O = 3,3 % y SiO₂ = 54,8 %).

El quimismo no define patrones precisos ya que las rocas analizadas están distribuidas de modo disperso. Caracteres de este tipo pueden ser generados por procesos de mezcla entre líquidos evolucionados con líquidos básicos o bien por procesos polibáricos de cristalización en líquidos iniciales geoquímicamente diferentes.

Los xenólitos testimonian la presencia de material cumulítico profundo caracterizado por la difusión del anfíbol. Las lavas transportadas a la superficie, prácticamente idénticas a las aflorantes, no resultan afectadas por apreciables procesos de alteración hidrotermal.

El conjunto de los datos petrológicos hace pensar que el sistema magmático que ha alimentado el volcán Colorado es profundo y tal vez de grandes dimensiones. La elevada profundidad es sugerida por la presencia de anfíbol como mineral próximo al liquidus también en las rocas básicas, y las relativamente grandes dimensiones del sistema de alimentación son sugeridas por la escasa variación composicional observadas en los productos eruptados.

Los domos lávicos de la zona de Cerro Pando tienen una edad alrededor de 1 Ma y una composición poco evolucionada (andesitas basálticas).

El Barú es un edificio volcánico complejo formado por un estrato cono antiguo prevalentemente lávico, cortado por fallas distensivas y por una serie de deslizamientos que produjeron grandes depósitos de avalancha de escombros y formaron una ancha depresión con forma de herradura, previamente interpretada, como en el caso del Colorado, como una depresión calderica.

Para comprender la causa de este cambio radical en la interpretación de las depresiones calderiformes del Colorado y del Barú, es conveniente recordar que cuando se iniciaron los trabajos de campo en 1984 ya se habían difundido ampliamente entre los vulcanólogos las ideas publicadas a raíz de la erupción del St. Helens (Estados Unidos) en 1980, que involucran la existencia de calderas o depresiones calderiformes cuya génesis no es de colapso por vaciado rápido de una cámara magmática, sino que es el resultado de la acción combinada de explosiones y deslizamientos que agrandan el cráter inicial hasta convertirlo en una pseudocaldera que frecuentemente tiene forma de herradura. Estos datos, ideas e interpretaciones, no estaban todavía difundidos al momento del trabajo geológico de reconocimiento de OLADE en 1981.

La actividad volcánica del Barú se reinició dentro de la depresión y se formó un gran cono, cortado por varios cráteres, que emitieron flujos de lava, depósitos piroclásticos, y también un domo de lava. La actividad explosiva inicial presenta una componente freatomagmática, indicativa de que ocurrió interacción entre el magma y agua subterránea, bajo el volcán.

Desafortunadamente, esta interacción ocurrió a poca profundidad, como lo indica el hecho que solo fragmentos de lavas frescas del volcán Barú fueron encontrados entre los xenolitos. Interacción entre magma y agua no ha sido observada en las últimas erupciones explosivas alimentadas por conductos ubicados al interior de la depresión central que cortan las rocas del basamento. Un comportamiento de este tipo sugiere que el antiguo edificio Barú estaba formado por rocas permeables saturadas con agua meteórica fría, y que las rocas del basamento no alojan acuíferos, por lo menos en sus partes someras debajo de la depresión del volcán Barú.

El volcán Barú es mucho más joven que el volcán Colorado, la actividad volcánica empezó aquí hace cerca 0,5 Ma y ha continuado hasta tiempos muy recientes. Las dataciones ^{14}C indican que la mayoría de los depósitos piroclásticos emitidos después de la formación de la depresión central tiene edades muy jóvenes, inferiores a 12 400 años. Los depósitos piroclásticos aflorantes al sur de Aguacate han dado edades de solo 980 y 690 años, que se colocan en plena época histórica, precolombina.

Los datos petrográficos y químicos indican que hay una cierta diferencia entre los productos del ciclo antiguo de actividad y los del ciclo más reciente. Los primeros tienen tenores en potasio mas elevados y una menor variación composicional en la mayoría de las rocas que resultan andesitas altas en K_2O caracterizadas por una relativa difusión del anfíbol, indicativa de una notable profundidad de cristalización.

Los productos del ciclo de actividad joven son en su mayor parte andesitas pertenecientes a la serie calcoalcalina normal. El pómez de los depósitos piroclásticos más recientes tiene composición dacítica y la actividad eruptiva incluye también una erupción fisural basáltica.

Los estudios petrológicos adicionales (análisis de la composición isotópica del Sr y análisis por microsonda de las fases minerales y del vidrio residual) sobre muestras seleccionadas del ciclo más reciente del volcán Barú, han permitido evidenciar los siguientes puntos:

- a. La homogeneidad de composición isotópica y los valores muy bajos de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,70348 a 0,70359) indican que los productos ácidos han sido generados por diferenciación de los magmas andesíticos; el bajo incremento de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en los productos más ácidos indica la existencia de procesos de contaminación crustal de importancia muy limitada.

- b. Los datos mineralógicos indican que los productos intermedios y ácidos (andesitas-dacitas) del Barú no pueden haber sido generados por fraccionamiento del basalto fisural, que muy probablemente corresponde a un líquido ascendido rápidamente a través de la corteza.
- c. La asociación de los productos recientes del volcán Barú presenta variaciones químicas y mineralógicas que pueden explicarse mediante un proceso de diferenciación por cristalización fraccionada ocurrido en el interior de la cámara magmática de alimentación del volcán.
- d. Asumiendo un sistema cerrado, los productos más ácidos (dacitas) representan cerca del 62% de un magma inicial de composición andesítica (el 22% de un magma basáltico).
- e. La presión del fraccionamiento que ha generado los productos más recientes y ácidos del Barú parece relativamente baja (PH₂₀ menor que 1 kb); en estas condiciones se puede suponer la existencia, en el volcán Barú, de un doble sistema de alimentación: una cámara magmática somera a una profundidad entre 3 y 6 km, donde se han generado los productos más recientes; y una más profunda, talvez en la base de la corteza continental, dentro de la cual han sido producidas las lavas andesíticas anfibólicas del edificio más antiguo.

- Hidrogeología

. Elementos hidrogeológicos

Desde el punto de vista hidrogeológico, existen en la zona de estudio dos complejos litológicos diversos por edad y características de permeabilidad: el basamento igneo del terciario y la serie volcánica pliocuaternaria.

El basamento terciario, constituido originalmente por lavas de naturaleza diversa, aglomerados y productos piroclásticos que incluyen ignimbritas, ha sido interesado, en una época comprendida entre el Mioceno y el Plioceno inferior, por numerosos fenómenos de intrusión de magmas de la misma naturaleza de las rocas volcánicas que han producido cuerpos gábricos, dioríticos y cuar-zomonzoníticos. Estas intrusiones han producido fenómenos de metamorfismo de contacto y generado procesos hidrotermales en el interior de las rocas volcánicas terciarias encajantes, que resultan hoy totalmente impermeables por autosellamiento y recristalización. Los afloramientos de rocas del basamento terciario, presentes en la proximidad de los complejos volcánicos cuaternarios, y la naturaleza de las mismas rocas encontradas en las perforaciones, indican que la permeabilidad del basamento es, por regla general, nula y solo puede ser aumentada localmente en zonas con densidad de fracturación distensiva y reciente muy elevada.

Los sistemas de fracturación más recientes que pueden haber mantenido permeabilidad son los de rumbo ENE-OSO y, en medida menor, los orientados NO-SE. Los demás sistemas de fallas son probablemente demasiado viejos y sellados por antiguos fenómenos hidrotermales relacionados con el emplazamiento de los cuerpos intrusivos, para poder contribuir a la permeabilidad actual.

Muy diversa y también compleja, es la situación de las formaciones volcánicas recientes. Desde el punto de vista hidrogeológico pueden distinguirse en ellas dos componentes esenciales: los niveles lávicos y los piroclásticos incoherentes. En el momento del emplazamiento los niveles piroclásticos tienen permeabilidad elevadísima, sobre todo por porosidad, mientras que las lavas tiene permeabilidad más baja, ligada esencialmente a la fisuración secundaria. Con el pasar del tiempo esta situación tiende a invertirse; la alteración meteórica argilitiza progresivamente los horizontes piroclásticos hasta convertirlos en niveles totalmente impermeables, mientras que las lavas, que son mucho menos afectadas por la alteración superficial, ven incrementar su permeabilidad por fracturación secundaria. Por estas razones y aún estando constituidos originalmente por los mismos tipos litológicos, los dos complejos volcánicos de Colorado y de Barú presentan hoy día, a causa de su diversa edad, una situación hidrogeológica diferente. Los horizontes piroclásticos superficiales muy recientes del Barú son de hecho altamente permeables, mientras que los análogos horizontes del Colorado están ya parcialmente impermeabilizados por argilificación y allí la secuencia lávica es la que puede aflorar los acuíferos principales.

Hay que hacer notar finalmente, que en la zona en estudio se producen importantes precipitaciones (2 500 a 4 000 mm por año) de lluvia, gran parte de las cuales se infiltra en el subsuelo y alimenta mantos freáticos superficiales (profundidad media de los pozos de agua de uso doméstico en la llanura de Volcán y Nueva California: 5 a 7 m).

. Modelo hidrogeológico

Como elementos básicos del sistema hidrogeológico existen, en definitiva, dos conjuntos bien definidos: el basamento, impermeable en general, pero en el que pueden existir zonas afectadas por tectónica reciente que desarrollen permeabilidad fisural y las formaciones volcánicas prevalentemente permeables del Barú y del Colorado.

En el basamento sólo hay evidencia de una circulación sub-superficial poco importante, sin interés geotérmico, que aprovecha el efecto superficial de apertura por decompresión litostática de fisuras que en profundidad están selladas. Por otra parte, hay circulación en el ámbito de fallas recientes como las que producen las manifestaciones termales de Cotito y Colorado.

La posibilidad de existencia de un sector de composición básica dotado de permeabilidad fisural tectónica quedaría circunscrita a fallas principalmente de dirección ENE-OSO. Sin embargo, en las áreas donde se ha inferido la existencia de basamento lávico, éste está a poca profundidad (Anexo No. 4), con poco espesor de cobertura y además ésta es permeable.

La zona considerada de mayor interés (llanura entre Bambito y Volcán) por tener un recubrimiento más potente, probablemente tenga un basamento de naturaleza aglomerática, cuyo desarrollo fisural es mínimo. Aun admitiendo que existan lavas, se piensa que el volumen de hueco interfisural será de poca entidad y los distintos compartimentos permeables estarán incomunicados entre sí, es decir, el modelo de circulación será de un conjunto de acuíferos dispuestos en franjas paralelas, subverticales, de forma tabular y poco voluminosos. La recarga se efectuaría por percolación desde los acuíferos más altos instalados en la secuencia volcánica pliocuaternaria.

El esquema de circulación subterránea en el caso de los edificios volcánicos se prevé como sigue:

Los dos edificios presentan una situación análoga, con un flujo radial divergente dirigido del centro hacia la periferia (Anexo No. 5). Esta concepción tan simple, pero cierta a gran escala, puede complicarse extraordinariamente en detalle a causa de discontinuidades horizontales (piroclastos y escorias compactadas, paleosuelos) o verticales (fallas, diques) por lo que localmente pueden haber acuíferos colgados, disposición en multicapa, etc. No obstante, estas barreras no tienen una continuidad lateral importante y los acuíferos se intercomunicarán, comportándose el conjunto como un gran acuífero libre.

En el edificio Colorado existe un sector hundido por fallamiento, recubierto por productos del Barú, de cuya configuración y existencia se ha tratado en el Informe No. 10 y que puede contener un acuífero confinado. Esta circunstancia puede tener interés geotérmico como se explica más adelante.

La alimentación de los acuíferos pliocuaternarios tiene lugar en toda su superficie aflorante, aunque con las naturales heterogeneidades en función de la pendiente, cobertura vegetal etc. En el caso del Colorado, donde los suelos arcillosos están bien desarrollados, la infiltración será menos eficaz que en el Barú, donde a causa de su mayor juventud no ha tenido tiempo de desarrollar suelos potentes.

Una particularidad a tener en cuenta cuando se realicen cálculos de balance hídrico, es la gran irregularidad en la distribución de las precipitaciones que están muy controladas por la topografía y esto podría inducir a errores en el cálculo del volumen de agua infiltrada.

- Geoquímica

Los técnicos de OLADE en cooperación con los técnicos del IRHE desarrollaron la fase de campo del Estudio del Complejo Barú-Colorado, en el período comprendido entre el 22 de octubre de 1984 al 9 de diciembre de 1984, recolectando 81 muestras de aguas y cinco de gas, los datos de campo son presentados en el Informe No. 6.

Los análisis químicos de las aguas fueron efectuados en el laboratorio del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) de Cerro Prieto, México y resultaron afectados por unos problemas de calidad analítica, descrito en el Informe No. 13. Sin embargo fue posible aplicar metodologías de cálculo y procesamiento muy complejos como el análisis de los componentes principales y el análisis de regresión múltiple. Los resultados de esta primera interpretación están presentados en el Informe No. 19.

En el período del 18 de diciembre de 1985 al 4 de enero de 1986, un segundo muestreo fue efectuado conjuntamente por personal del IRHE y del IIE. El IIE efectuó después los análisis de laboratorio, cuyos resultados son presentados en el Informe No. 25, y finalmente interpretó sus datos geoquímicos (Informe No. 26).

Los nuevos datos geoquímicos han sido procesados e interpretados, conjuntamente a los del primer muestreo para extraer la máxima información del material disponible. Los principales resultados de todo este trabajo son resumidos a continuación y se sintetizan en el Anexo No. 6.

Las fuentes termales de Los Pozos, Catalina, Colorado (localizadas a lo largo de la misma falla de dirección NE-SO) y Cotito-Hornito (a lo largo de una falla con el mismo rumbo, unos kilómetros al oeste) han representado por muchos años el único punto de interés de los estudios geoquímico y geotérmicos desarrollados en la región de Barú-Colorado (ver referencias a los estudios geoquímicos desarrollados en el período 1976 a 1983 (Informe No. 1).

Solamente en este Proyecto, aplicando la metodología de OLADE, el área alrededor de los dos edificios volcánicos de Barú y Colorado ha sido explorada de manera completa.

Las ya mencionadas fuentes termales tienen composición cloruro-alcalina; la temperatura (26 a 66°C) y el TDS (25 a 240 meq/l) son muy variables debido a la ocurrencia de fenómenos de mezcla con aguas someras y/o de pérdidas de calor diferentes. Además se observan unas diferencias composicionales (razones Ca/Mg y SO₄/Cl), entre las diferentes manifestaciones, que hacen pensar en la existencia de acuíferos termales distintos. Todas las aguas termales están caracterizadas, como es costumbre, por altos contenidos de Li, B, SiO₂ y NH₄ y bajos contenidos de NO₃. Además hay que subrayar que el contenido de Mg es relativamente alto (respecto a los otros cationes disueltos) y no está relacio-

nado a fenómenos de mezcla con agua someras, sugiriendo por lo tanto bajas temperaturas hidrogeoquímicas. En efecto los valores siguientes han sido evaluados:

- a. 105 y 125°C en Cotito Hornito;
- b. 80°C en Los Pozos;
- c. 45 y 50°C en Catalina;
- d. 35°C en Colorado.

Los gases indicarian temperaturas de equilibrios mucho mayores, alrededor de 250°C; pero debido a la fuerte diferencia entre este valor y las bajas temperaturas hidrogeoquímicas, se concluye que la temperatura geoquímica de los gases está probablemente relacionada a un sistema muy profundo, que podría no ser alcanzado por la exploración mecánica.

La gran mayoría de las aguas someras pertenecen al tipo bicarbonato-alcalino-térreo y presentan caracteres fisicoquímico bastante homogéneos ($T = 12$ a 23°C ; $\text{TDS} = 0,5$ a $4,5$ meq/l, escasas variaciones en las razones Na/K y Ca/Mg). Estas aguas son el producto de la interacción entre aguas meteóricas y rocas volcánicas, proceso que está controlado por el anhídrido carbónico disuelto, mientras que la agregación de sulfato y cloruro es prácticamente insignificante. Sin embargo se reconocen unas aguas bicarbonato-alcalino-térreas con débil tendencia sulfatada, caracterizadas también por un incremento de Mg relativo al Ca y del Na relativo al K , respecto a la gran mayoría de las aguas someras; la temperatura y los TDS tienen valores de 17 a 21°C y de $2,0$ a $4,5$ meq/l, respectivamente. El origen de estas aguas está probablemente conectado a la interacción de aguas del tipo químico principal con rocas hidrotermalizadas, que tiene un contenido anómalo de sulfatos (o sulfuros) no obstante no se puede excluir totalmente la intervención de gases que contienen H_2S .

El estudio de la distribución de los indicadores de fuga y de la temperatura en las aguas someras y superficiales no ha evidenciado ninguna anomalía significativa, ni de ácido bórico, ni de amoníaco, relacionada con la ocurrencia de fenómenos de ebullición en el subsuelo. Por lo contrario ha sido detectada una anomalía térmica y de anhídrido carbónico en el área de Volcán, que sugiere la subida de aguas termales hacia la superficie (sin ocurrencia de fenómenos de ebullición) a lo largo de una falla de orientación NO-SE; estas aguas termales se infiltran, probablemente, en un acuífero localizado a profundidad relativamente baja y podrían representar un interesante recurso de bajo contenido entálpico.

4.5.3 Implicaciones geotérmicas

Uno de los resultados principales de las nuevas investigaciones geovulcanológicas realizadas en la zona Barú-Colorado, lastimosamente desfavorable desde el punto de vista del interés geotérmico del área, ha sido el establecer que las depresiones morfológicas presentes en las partes centrales de los dos edificios volcánicos

no son calderas de colapso sino estructuras producidas por complejos fenómenos tectónicos de deslizamiento en masa y de erosión.

En el Informe Geovulcanológico No. 17 se han analizado las evidencias de campo con base en esta nueva interpretación, que ha sido también compartida por los expertos de la Junta Asesora del Proyecto. Analizamos ahora las implicaciones geotérmicas de este resultado. En el caso específico del área Barú-Colorado, la presencia de estructuras caldéricas de colapso tenía dos importantes implicaciones:

- a. Representaba una evidencia de la existencia de cámaras magmáticas someras, siendo un colapso caldérico necesariamente relacionado con el vaciamiento rápido de la parte más alta de un reservorio magmático superficial. A su vez esto implicaba una buena probabilidad de ocurrencia de una importante anomalía térmica producida por estas cámaras magmáticas, sobre todo en el caso del volcán Barú, de edad muy joven.
- b. La presencia de estructuras hundidas por colapso volcano-tectónico habría podido permitir una importante acumulación de lavas (procedentes de la actividad postcaldera), hasta alcanzar un espesor suficiente para alojar un sistema geotérmico encima del basamento de permeabilidad baja o nula.

Por lo contrario, una estructura por deslizamiento reduce la cobertura volcánica no existiendo algún hundimiento del basamento.

Estas dos perspectivas tiene por lo tanto que ser ahora descartadas y por lo contrario las depresiones centrales deben ser consideradas las zonas, dentro de los edificios volcánicos, donde el techo del basamento impermeable se encuentra más cerca de la superficie (Anexos Nos. 4 y 5). El problema geotérmico global del área Barú-Colorado debe ser por lo tanto reevaluado y las siguientes consideraciones pueden ser hechas a la luz de todos los datos disponibles.

- Fuente de calor

Este aspecto tiene que ser considerado con mucho cuidado. La Cordillera de Talamanca es el resultado de una muy intensa actividad ígnea calcoalcalina de edad Terciaria, que incluye actividad volcánica e intrusiones. Por analogía con los datos estratigráficos y las dataciones radiométricas disponibles en otros sectores, geológicamente similares, de la Cordillera ígnea de Panamá, se puede asumir que esta actividad se desarrolló en época Oligoceno-Miocénica.

El nivel de la erosión es muy profundo en la Cordillera, como lo indica el afloramiento de cuerpos intrusivos del Terciario superior. No obstante, una anomalía térmica residual podría persis-

tir por lo menos en la parte profunda de la corteza. Los dos volcanes Colorado y Barú se formaron después sobre esta Cordillera y uno de los objetivos del programa actual de investigación geotérmica, estaba dirigido a la evaluación de la contribución de estos dos sistemas volcánicos a la fuente de calor del área.

A causa de su edad relativamente antigua y de la probablemente elevada profundidad de su sistema de alimentación, el volcán Colorado no parece poder proporcionar una significativa contribución térmica. Bien diferente se presenta la situación del volcán Barú; en efecto, este volcán es mucho más joven y puede ser considerado todavía activo. Además, los datos petrológicos sugieren que sus productos han sido generados por fraccionamiento al interior de una cámara magmática somera (3 a 6 km). Habría sido importante, para evaluar las condiciones térmicas existentes en profundidad, poder estimar el volumen de la cámara magmática. Desafortunadamente en el caso del Barú esto resulta prácticamente imposible, en efecto, la actividad del Barú está caracterizada por erupciones muy frecuentes de magma con composición intermedia a ácida (andesitas evolucionadas a dacitas) que ha sido estimado con métodos petrológicos, representan el 50 a 60% en peso de un líquido primario con la composición de una andesita basáltica. Sin embargo, estos datos no pueden ser utilizados para evaluar el volumen mínimo de la cámara magmática, debido al hecho que el Barú no ha producido una erupción mayor, sino una serie de erupciones de tamaño mediano.

La elevada frecuencia de las erupciones está de acuerdo con el grado moderado de la evolución de los productos; ambos factores sugieren un sistema de alimentación abierto hacia el profundo, con frecuente realimentación de magma andesítico y tiempo de permanencia en el interior de la cámara relativamente corto. En tales condiciones, el líquido liviano y evolucionado, acumulado en la parte alta de la cámara magmática y expulsado por las erupciones, podría representar, en efecto, solo una pequeña fracción del volumen total de la cámara.

La persistencia de los mismos caracteres petrológicos a lo largo de toda la historia eruptiva del Barú, y las idénticas presiones de cristalización estimadas por los líquidos andesíticos y dacíticos (ver Informe No. 20) sugieren que el modelo de alimentación más probable para el Barú es el de una cámara magmática somera, de dimensiones notables y frecuentemente realimentada. Esta cámara magmática podría, por lo tanto, representar una importante fuente de calor, a pesar del hecho que nunca ocurrió una mayor erupción piroclástica con subsiguiente colapso caldérico.

A luz de estas consideraciones, el problema principal de la exploración geotérmica del complejo Barú-Colorado, no parece estar tanto relacionado con la presencia de la anomalía térmica, cuanto con la ocurrencia de las condiciones hidrogeológicas necesarias para el desarrollo de un sistema geotérmico de alta entalpía a profundidad económica.

- El problema del reservorio

En su conjunto, el cuadro hidrogeológico (Anexo No. 5) del complejo Barú-Colorado no se presenta muy favorable desde el punto de vista geotérmico, en efecto:

- a. El basamento terciario es sustancialmente impermeable por tanto no parece posible que pueda alojar acuíferos de una cierta consistencia; una circulación limitada de fluidos puede tener lugar solamente a lo largo de zonas de fracturas y este es probablemente el caso de las manifestaciones termales ubicadas en las pendientes del Colorado, en zonas donde el basamento resulta muy superficial; la probabilidad de existencia de un reservorio con importante extensión lateral es por lo tanto muy baja.
- b. Falta una cobertura impermeable eficaz y extensa encima de las rocas del basamento. Siendo la mayoría de las formaciones volcánicas recientes de elevada permeabilidad alojan con seguridad importantes acuíferos fríos de recarga meteorica.
- c. El espesor de las lavas cuaternarias nunca parece suficientemente extenso, máximo 500 m, como para alojar en su interior un sistema geotérmico de alta entalpía; además, la falta de cobertura en una zona de intensas precipitaciones atmosféricas impide la formación de sistemas hidrotermales al interior de la serie volcánica reciente, lo cual está confirmado por la falta de alteración hidrotermal en los xenolitos procedentes de esta serie.

Los resultados de los estudios geoquímicos son también poco prometedores: las temperaturas geoquímicas son bajas y no se han identificado anomalías relacionadas con fuga de vapor; solo la geoquímica de los gases indica la posibilidad de existencia de un sistema hidrotermal profundo. Sin embargo, hay que destacar que las particulares condiciones hidrogeológicas del área Barú-Colorado, con circulación importante de agua fría a poca profundidad, podrían enmascarar los efectos geoquímicos de la subida de fluidos calientes desde zonas profundas.

5. SELECCION DE LAS AREAS DE INTERES GEOTERMICO Y DEFINICION DE LAS PRIORIDADES

Los resultados obtenidos en el Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional y en el Estudio del Complejo Barú-Colorado, permiten seleccionar las áreas de "El Valle de Antón" y de "Chitra-Calobre" como las únicas que ofrecen perspectivas para exploración geotérmica de alta entalpía.

En una escala de prioridad relativa se destaca el área de "El Valle de Antón" como la más prometedora por las razones siguientes:

- a. Presencia de una evidente fuente de calor somera (cámara magmática con asociado colapso caldérico de "El Valle").
- b. Presencia de una estructura tectónica muy clara con características hidrogeológicas y geoquímicas prometedoras.

Por estas razones el área del "Valle de Antón" merece el grado de prioridad más elevado.

El área de "Chitra-Calobre" presenta elementos geovulcanológicos, hidrogeológicos y geoquímicos (estos últimos serán profundizados en la exploración complementaria ya decidida) también interesantes, pero con algunas dudas sobre la entidad de su anomalía térmica, debido a la modestia de los fenómenos volcánicos cuaternarios.

Las otras dos áreas investigadas con mayor atención en el curso del Estudio de Reconocimiento (Isla de Coiba y Tonosí) no ofrecen perspectivas para recursos de alta entalpía a profundidad económica.

En ambas áreas faltan las evidencias de una fuente de calor somera y deberían presentar un gradiente geotérmico cerca del normal. El área de Tonosí ofrece algunas buenas perspectivas para recursos de entalpía media a baja.

6. UN PROBABLE PROGRAMA PARA LA UTILIZACION DE LOS RECURSOS GEOTERMICOS DE BAJA A MEDIA ENTALPIA EN EL AREA DE TONOSI

Los estudios geológicos y geoquímicos realizados dentro del marco del Estudio Nacional de Reconocimiento Geotérmico, indicaron que el área de Tonosí no ofrece perspectivas para la generación de energía eléctrica mediante la utilización de recursos geotérmicos de alta entalpía. Esta conclusión se basó en la falta de datos vulcanológicos y geoquímicos que comprobaran la existencia de una fuente de calor somera y de fugas de vapor geotérmico.

Los mismos estudios han demostrado la posible existencia, en el área de Tonosí, de fluidos geotérmicos de baja o media entalpía, lo cual podría representar un interesante recurso económico para la República de Panamá.

El propósito de este capítulo es el de analizar un posible programa de exploración y explotación de estos recursos, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- a. Definición de los objetivos de una fase exploratoria adicional y evaluación de costos.
- b. Enumeración de todos los posibles usos directos de los fluidos geotérmicos en el área de Tonosí.

6.1 Objetivos de una Fase Exploratoria Adicional

Los resultados del Estudio de Reconocimiento han demostrado que el área de Tonosí se caracteriza por las siguientes condiciones geológicas e hidrogeológicas:

- a. Un basamento mesozoico formado por rocas ultrabásicas, lavas basálticas y aglomerados submarinos, posiblemente pertenecientes a la corteza oceánica.
- b. El basamento está cubierto por la formación "Ocu" del Cretáceo superior y consiste en calizas bien estratificadas e intercaladas dentro de limolitas, areniscas, conglomerados vulcanogénicos y rocas volcánicas menores.
- c. Las rocas más recientes son lavas eocénicas con depósitos piroclásticos menores, los cuales localmente cubren areniscas latíticas casi contemporáneas.
- d. Las rocas cretáceas tienen profundas fallas y pliegues; toda el área está afectada por fallas tensionales con una dirección NO-SE de alcance regional y por un sistema conjugado NE-SO de menor importancia.

- e. Las fuentes termales están claramente relacionadas con estas fallas principales; su temperatura varía entre 28 a 46 °C y su valor máximo se observa en Agua Caliente. La composición química sugiere que las aguas termales interactuaron a poca profundidad con los sedimentos eocénicos.

Las condiciones hidrogeológicas globales parecen bastante prometedoras. En efecto, existen varias unidades rocosas, tales como lavas que están extendidas en varias formaciones, o las calizas cretáceas, que son rígidas y quebradizas. Puesto que el área está afectada por una intensa y reciente actividad tectónica, una buena permeabilidad de fractura puede desarrollarse dentro de estas rocas, por lo que podrían representar buenos acuíferos. Hay capas de baja permeabilidad en el complejo sedimentario eocénico, e incluso en el complejo volcánico eocénico, donde existen depósitos piroclásticos cementados y meteorizados.

Aunque no existen evidencias de una anomalía térmica en el área de Tonosí, la posible presencia de fluidos geotérmicos de media-baja entalpía está vinculada con la muy probable existencia de un importante surgimiento desde circuitos ubicados en profundidad, y con su infiltración lateral dentro de los acuíferos someros.

A la luz de la información disponible, dos zonas merecen prioridad en la exploración de recursos geotérmicos de media entalpía: los sitios termales de Pedregal y Agua Caliente.

Ambos sitios presentan realmente las mejores condiciones hidrogeológicas y fundamentalmente, la presencia de una capa sello potente (los sedimentos eocénicos) encima de dos yacimientos potenciales (calizas y formaciones lávicas). Sus aguas termales tienen la mayor temperatura (46°C en Agua Caliente y 41°C en Pedregal) del área de Tonosí.

Además, las dos zonas están ubicadas en correspondencia con la zona de fallas centrales de Tonosí, en la cual dos fallas principales NO-SE atraviesan toda el área. Las aguas termales de Pedregal están ubicadas a lo largo de una de estas fallas, mientras que las fuentes termales de Agua Caliente surgen a través de una falla conjugada transversal NE-SO (véase el mapa geológico escala 1:100 000 adjunto al Informe de Reconocimiento Geovulcanológico).

En este contexto geológico e hidrogeológico, una fase exploratoria adicional debería orientarse hacia los siguientes objetivos:

- a. Reconstrucción de la geometría de las calizas cretáceas y del complejo ígneo subyacente.
- b. Reconstrucción del modelo geotérmico e hidrogeológico local.
- c. Selección de los sitios adecuados para una perforación productora de aguas calientes y establecimiento de un programa de perforación.

6.2 Organización y Costo de una Fase Exploratoria Adicional

Considerando los objetivos de la exploración descrita en los párrafos precedentes, debería ejecutarse el siguiente programa:

a. Geología

Deben elaborarse mapas geológicos detallados (1:25 000 o en mayor escala) en ambas zonas (Agua Caliente y Pedregal), centrados en las aguas termales y abarcando, en cada zona, una superficie aproximada de 100 km cuadrados. Debería dedicarse especial atención a la evaluación de las condiciones de permeabilidad de las diferentes formaciones rocosas, a la elaboración de mapas detallados de todas las fracturas y fallas clasificadas de acuerdo con su edad relativa, y a la formulación de un modelo hidrogeológico (circulación de agua) con énfasis en la zona de surgimiento de fluidos calientes.

Tiempo de trabajo necesario:

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 1 geólogo: Trabajo de campo | 1,5 meses |
| Trabajo de oficina | 1,5 meses |
| Total | 3,0 meses |

Costo estimado de un experto extranjero: 20 000 a 25 000 USD

b. Geofísica

Una serie de sondeos geoelectrónicos de tipo Schlumberger, con un espaciamiento AB que permita llegar a una penetración de 1 000 m por lo menos, parece el mejor método geofísico utilizable para descifrar la estructura de las zonas termales de Tonosí. Un total de unos 30 EVS con espaciamiento de 1 km debería realizarse en la zona de Pedregal; además de lo cual deberían efectuarse unos 32 EVS en Agua Caliente, abarcando igualmente la zona de Cortezo, unos 5 km al sur de Agua Caliente, donde surge una fuente termal a través del complejo cretáceo (Figuras Nos. 11 y 12). Esta parte del programa ha sido aprobado por el geofísico de la Junta Asesora, el Dr. A Duprat.

Tiempo de trabajo requerido:

| | |
|----------------|-----------|
| Interpretación | 1,5 meses |
| Campo | 2,0 meses |

Costo estimado: 50 000 a 60 000 USD

6.3 Costo del Desarrollo (preplanta)

Se pueden considerar varios casos posibles para producir el fluido geotérmico requerido:

- a. Utilización directa de aguas termales, mediante sencillos trabajos de captación, con un costo total estimado de 50 000 USD.
- b. Perforación de pozos someros, hasta un total de 500, 1.000 o 2.000 metros perforados; estos pozos deberán perforarse para que lleguen a un yacimiento ubicado a poca profundidad y/o para reinyectar los fluidos residuales. Se ha calculado un costo de perforación de 350 USD/m. Este costo incluye:
 - 150 USD/m, costo promedio de perforación de pozos de agua.
 - 60 USD/m, alquiler de un aparejo de perforación, considerando la posibilidad de que no se encuentren aparejos corrientes para perforación de pozos de agua.
 - 140 USD/m, para cubrir el costo de las obras civiles, movilización y materiales para grandes diámetros (por lo menos de 9"5/8) necesarios para los altos caudales requeridos, preparación para pruebas, mediciones y terminación de pozos.

La Figura No. 13 indica el costo promedio para una perforación costa adentro en relación con la profundidad. Puede verse que un solo pozo de 1 000 m de profundidad puede costar incluso más que 350 000 USD. Por lo tanto, es evidente que el costo de los pozos de producción depende, principalmente de la profundidad del yacimiento productor.

Además, deben contemplarse algunas pruebas de producción y el estudio geoquímico de los fluidos producidos, a fin de evaluar el potencial mínimo del yacimiento y de definir las características químicas del fluido producido y de los problemas conexos de dimensionamiento y del medio ambiente.

Costo estimado de algunas pruebas de producción:

| | |
|--|---------------------|
| pruebas físicas | 30 000 a 50 000 USD |
| pruebas geoquímicas, que incluyen análisis de agua y gases | 15 000 USD |

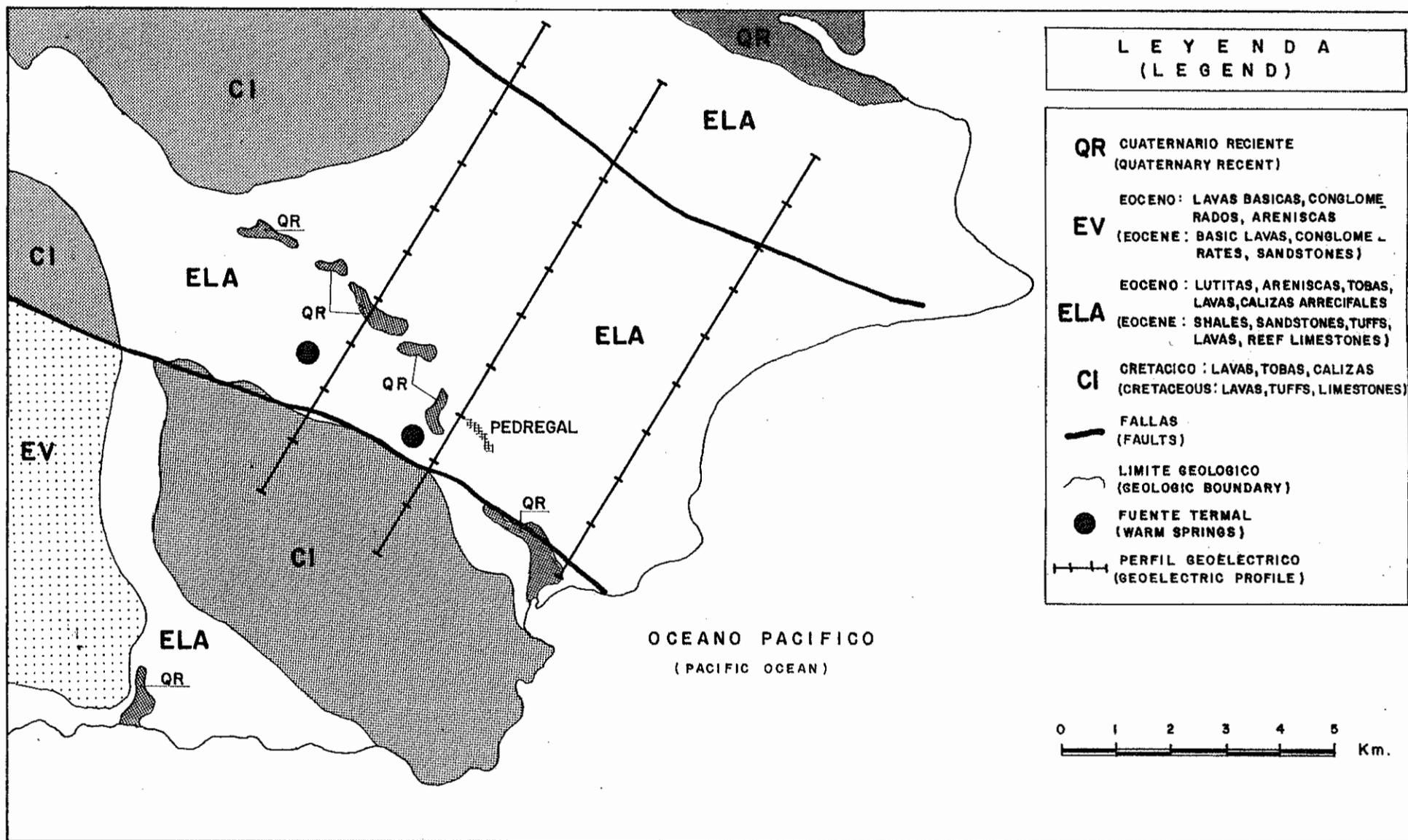


FIG. II PERFILES GEOELECTRICOS SUGERIDOS PARA LA ZONA "PEDREGAL" DE TONOSI
GEOELECTRICAL PROFILES SUGGESTED FOR TONOSI (PEDREGAL) ZONE

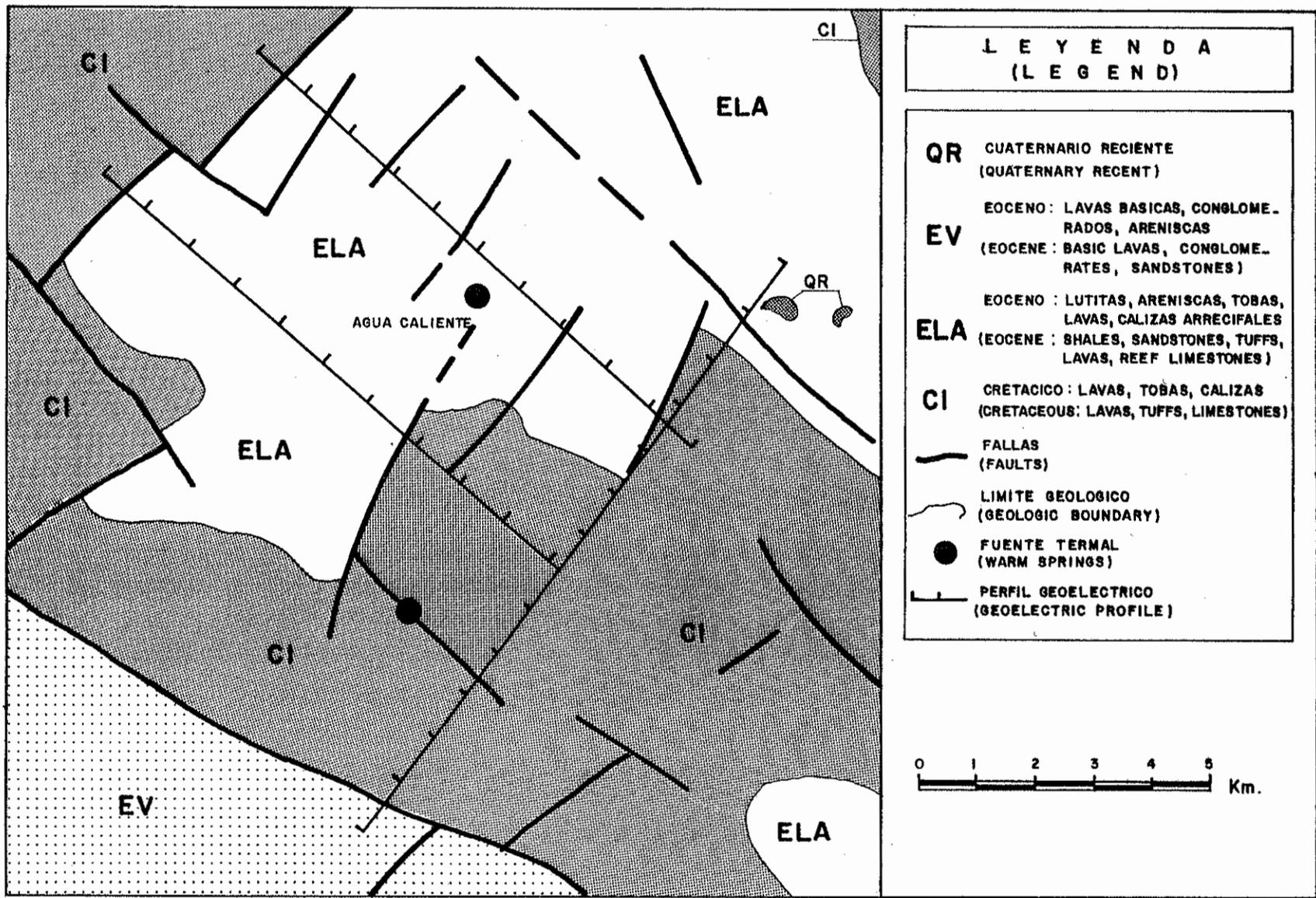


FIG. 12 PERFILES GEOELECTRICOS SUGERIDOS PARA LA ZONA "AGUA CALIENTE - EL CORTEZO" DE TONOSI
 GEOELECTRICAL PROFILES FOR TONOSI (AGUA CALIENTE-EL CORTEZO) ZONE

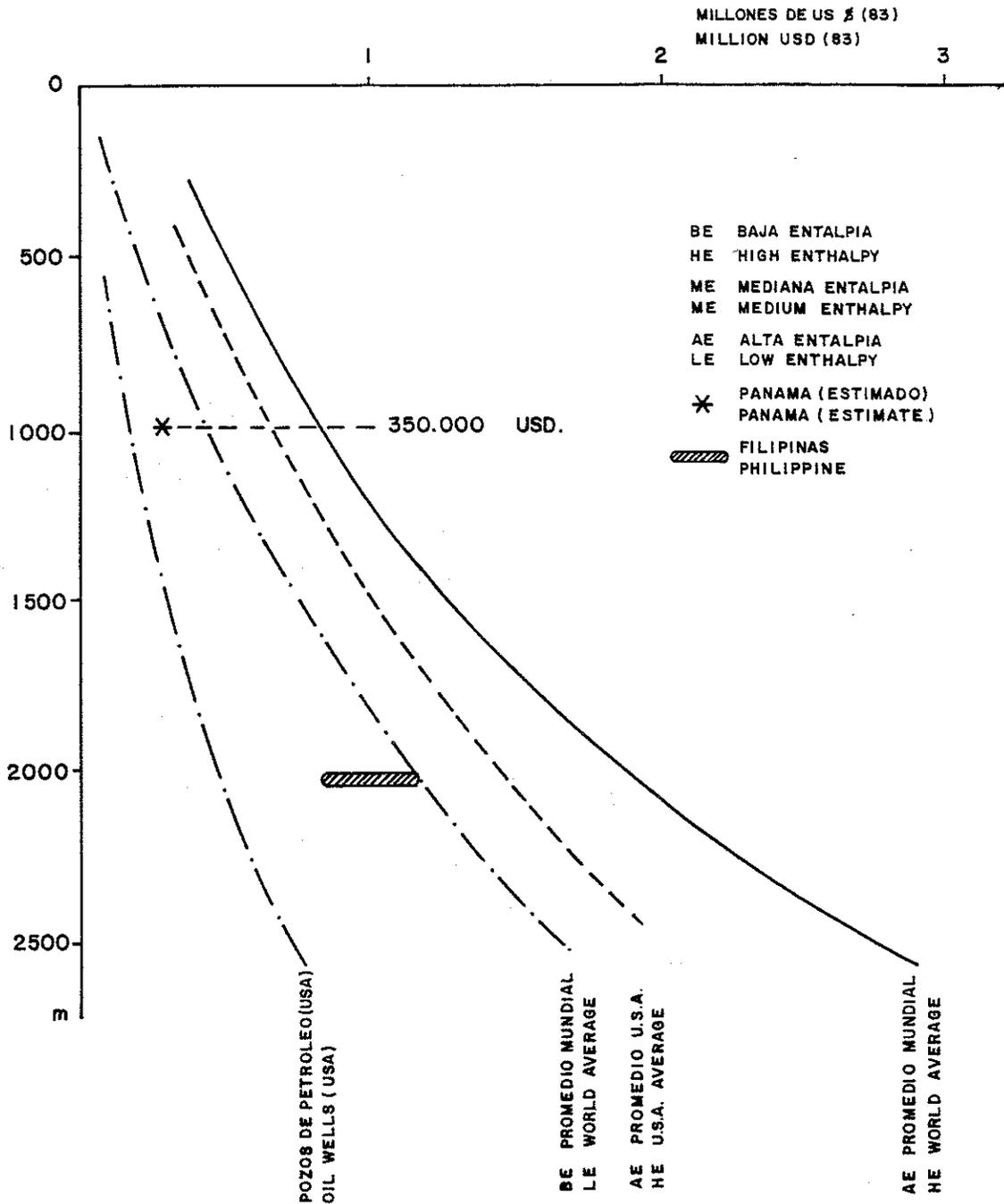


FIG. 13 COSTO DE POZOS EXPLORATORIOS "ON SHORE" EN FUNCION DE LA PROFUNDIDAD
(ON-SHORE DRILLING COST VERSUS DEPTH)

6.4 Posibles Usos de los Fluidos Geotérmicos de Baja Entalpía en el Área de Tonosí

En el área de Tonosí, los fluidos geotérmicos podrían utilizarse para las siguientes aplicaciones:

- a. Pequeñas unidades de generación eléctrica (ciclo binario: 200 KW). Este tipo de aplicación utiliza fluidos con una temperatura de 90 a 100°C.
- b. Pesquería y otras empresas que necesitan calor y CO₂, como por ejemplo, grandes estanques para acuicultura, e instalaciones para el secado y conservación en frío de pescado (-30 a +4°C).
- c. Usos en la agricultura, horticultura y otros afines, como por ejemplo el empleo de secadores para uno o más productos cuyas épocas de cosecha son distintas, tales como el té, café y tabaco.
- d. Usos industriales: dependiendo de las temperaturas presentes en los fluidos geotérmicos, es posible satisfacer las necesidades de calor industrial, total o parcialmente. En este contexto, los fluidos geotérmicos pueden utilizarse en los siguientes tipos de industrias: a) alcohol, b) azúcar, c) papel, pulpa de madera, d) enlatado de carnes, frutas y legumbres, e) cemento.

6.4.1 Generación de electricidad con pequeñas unidades

Aunque no es prometedora para la generación de electricidad con grandes unidades geotérmicas, el área de Tonosí puede contener, a una profundidad económica, fluidos geotérmicos de media entalpía, los cuales podrían utilizarse para pequeñas unidades de generación eléctrica. A fin de contar con elementos de juicio para evaluar la posibilidad económica de dicha aplicación, se ha considerado el caso de una pequeña unidad de ciclo binario de 200 kW. El ciclo binario, o ciclo Rankine, se basa en la transferencia de calor desde el fluido geotérmico hasta un fluido operante (freón, butano, etc.), con un bajo punto de ebullición. Las dimensiones de las plantas suelen ser pequeñas y en la actualidad no superan 11 MW (East Mesa, California); se está construyendo una planta binaria de 55 MW en Heber, California.

El flujo másico de agua (presuponiendo una temperatura de 100 °C), las inversiones y los costos de explotación se indican en la Tabla No.1, véase también la Figura No. 14 para el costo específico de las pequeñas unidades eléctricas.

6.4.2 Usos directos en zootecnia y agroindustria

En estos sectores económicos, los fluidos geotérmicos pueden utilizarse en la producción, elaboración y conservación de alimentos.

a. Invernaderos

El área de Tonosí es especialmente adecuada para la creación de un ambiente climatizado, todo el año, con condiciones opcionales de temperatura (calentamiento y enfriamiento) y de humedad, y la eventual adición de CO₂ de origen geotérmico, que estimula la producción de biomasa.

b. Acuicultura

La producción animal y vegetal (productos agropecuarios) peces, algas, plantas ornamentales) se destinará al consumo tanto humano como animal.

c. Elaboración de alimentos

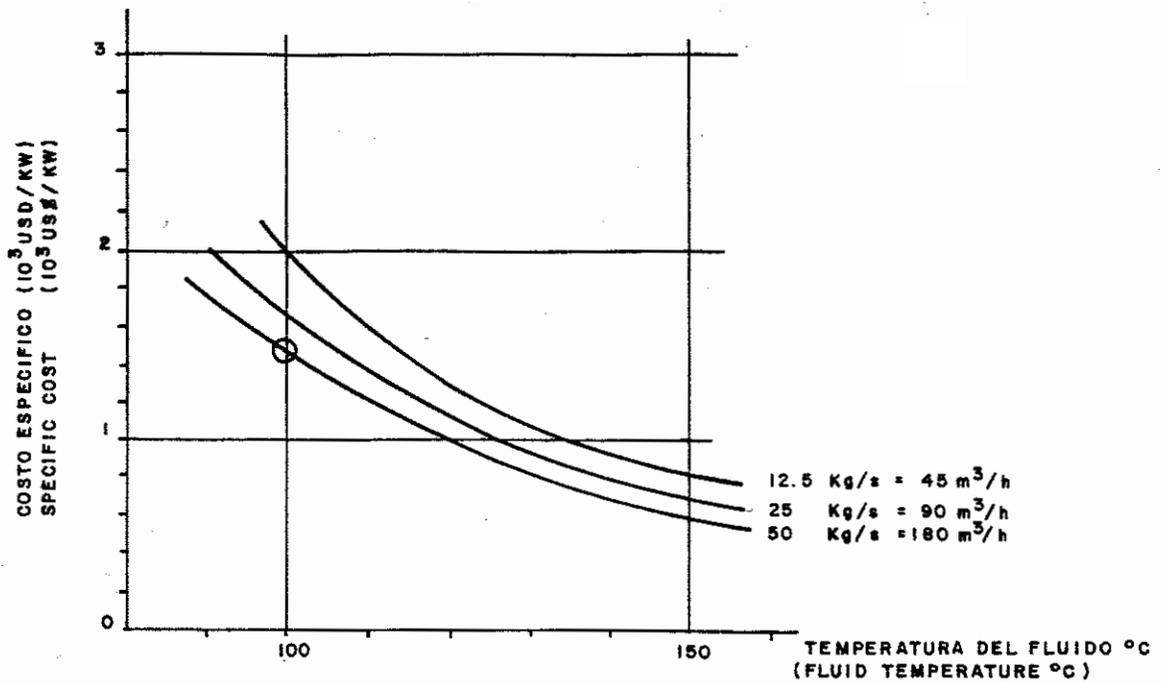
- Producción de jugos de fruta (Figura No. 15)
- Conservas Alimentarias: Esto se hará mediante el secado moderado o forzado (pelotillas), conservación en frío (-30 a +4°C), producción de hielo, liofilización, etc; la factibilidad de estos procedimientos se basa en la disponibilidad de calor ya sea directo como indirecto (40 a 160°C).

El cultivo de cereales, té, café y tabaco requiere de procesos de secado. Los procesos de secado normalmente utilizados incluyen el secado al sol, la ventilación natural, la combustión con combustóleo y también la ventilación eléctrica.

Los procesos de secado natural frecuentemente están sujetos a condiciones climáticas impredecibles, por ejemplo, una lluvia repentina. Más aún, el proceso natural es mucho más lento que el artificial, y suele provocar la fermentación, lo cual empobrece el valor nutritivo del producto o altera su aroma. Los procesos de secado artificial, que constantemente permiten contar con productos de mejor calidad, necesitan bastante energía; podrían operarse en forma más provechosa utilizando calor geotérmico, de ser posible.

d. Industria azucarera

La industria azucarera es una de las más importantes usuarias de energía suplementaria, generada ya sea con leña o combustóleo. Convendría considerar la posibilidad de sustituir parte de esos petróleos combustibles (que podrían em-

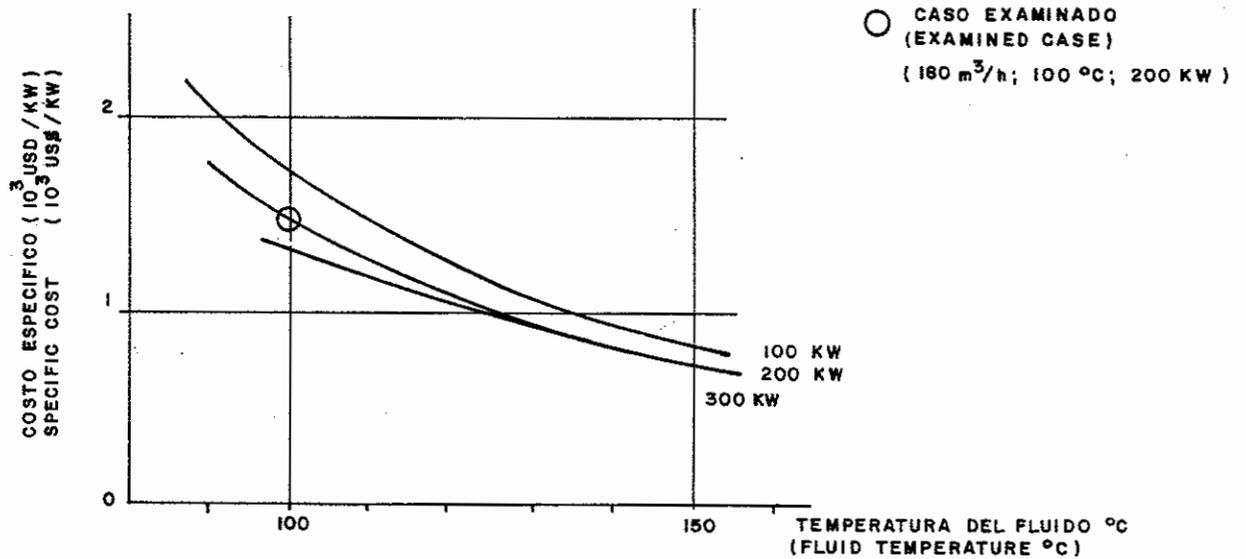


A. FLUJO CONSTANTE DE MASA DE AGUA CALIENTE .

COSTOS ESPECIFICOS PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE SALIDA

A. CONSTANT HOT WATER MASS FLOW

SPECIFIC COSTS AT DIFFERENT OUTLET TEMPERATURES



B. CAPACIDAD INSTALADA CONSTANTE

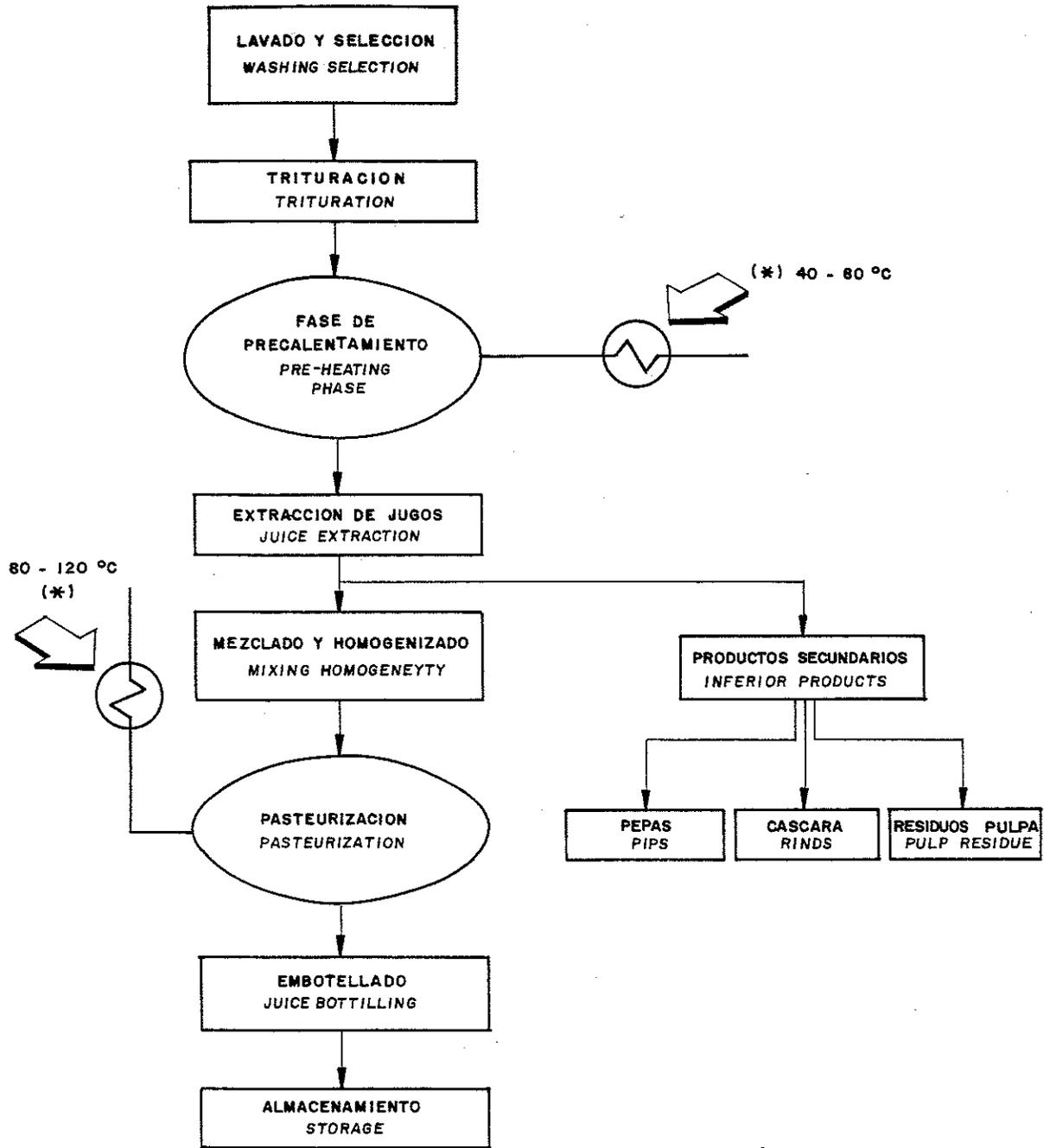
COSTO ESPECIFICO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE SALIDA

B CONSTANT INSTALLED CAPACITY

SPECIFIC COSTS AT DIFFERENT OUTLET TEMPERATURES

FIG.14 COSTOS ESPECIFICOS DE PEQUEÑAS UNIDADES ELECTRICAS (SPECIFIC COSTS OF SMALL ELECTRIC UNIT)

CICLO DE PRODUCCION DE JUGOS
FRUIT JUICE PRODUCTION CYCLE



(*) POSIBLE ALIMENTACION DE LA ENERGIA DE FLUIDOS GEOTERMICOS
 POSSIBLE ENERGY FEEDING BY GEOTHERMAL FLUIDS

FIG. 15 POSIBLE UTILIZACION DE LA ENERGIA GEOTERMICA
(POSSIBLE GEOTHERMAL ENERGY UTILIZATION)

plearse con mayor provecho para la generación de electricidad) con fluidos geotérmicos.

e. Producción de alcohol

Las bebidas alcohólicas (cerveza, whisky, etc.) pueden producirse a partir de cereales, utilizando procesos de calor geotérmico (véase la Figura No. 16).

El alcohol, que puede satisfacer muchas de las necesidades del sector del transporte, así como las de otros consumidores de energía, puede obtenerse de la madera (metanol) o de otras biomásas, tales como el bagazo (etanol).

El metanol se puede obtener fácilmente de las industrias maderera y forestal (ramas, raíces, etc.), solo cuando se dispone de mano de obra a un precio convenientemente bajo para recolectar los desechos. En vez de ello, se puede obtener etanol de los cereales y de la industria azucarera.

La producción de alcohol requiere grandes volúmenes de calor; en efecto, las temperaturas necesarias para la producción de alcohol son: 35°C para la fermentación y 110°C para los procesos de destilación y concentración.

Las plantas productoras que utilizan energía geotérmica han estado funcionando desde hace algún tiempo atrás, principalmente en los Estados Unidos.

f. La industria maderera: papel, pulpa de madera o pulpa de paja (Figura No. 17)

Las industrias papeleras y madereras necesitan considerables cantidades de energía y deben contar con agua caliente: se necesitan 2,5 toneladas de madera, o 2 toneladas de paja, para producir 1 tonelada de pasta seca (60% de humedad) empleando de 18 a 21 metros cúbicos por hora de agua caliente y 7,5 a 8,5 t/h de vapor. Nueva Zelanda posee la planta más grande del mundo, la cual produce pulpa de madera por medio de la energía geotérmica.

g. Curado del té

Se necesitan temperaturas de 24 a 45°C para curar y 70°C para secar el té (Figura No. 18), con consumos de 0,5 litros de combustóleo por kg de té (el producto más fino). Debe mencionarse que 100 kg de hojas verdes sirven para obtener 23 kg de té seco.

El secado se suele realizar por medio de la ventilación eléctrica con aire forzado, proceso que dura aproximadamente 18 horas.

h. Pesquería y acuicultura

Los productos pesqueros y, especialmente, las algas con un alto contenido proteínico (2 a 3 veces el de la carne y soya), representan un recurso alimentario de importante valor nutritivo, al que todavía se lo descuida en los regímenes alimentarios de una buena parte de la población mundial.

Su rápido ciclo de crecimiento y su abundante producción por unidad de área dan una importancia crítica a este recurso en la lucha mundial contra el hambre. Tanto en Europa como en los EE.UU. estas algas de alto contenido proteínico se venden a precios sumamente altos como productos dietéticos.

La energía geotérmica es de gran importancia en el contexto de la pesca y puede utilizarse de las siguientes maneras:

- Acuicultura intensiva (aguas geotermales con una temperatura de 25 a 40°C) de algas y crustáceos de gran contenido proteínico, tanto para alimento humano como animal, y la cría de peces para contribuir a la repoblación de extensiones de agua. La temperatura de agua que se mantiene constante todo el año, mejora notablemente la cría de peces, crustáceos y algas.
- La conservación de productos del mar por medio del hielo, el congelamiento (de +4 a -30°C), el secado y producción de harina de pescado.

6.5 Conclusiones

El área de Tonosí, debido a su entorno hidrogeológico y tectónico, ofrece algunas perspectivas para la presencia, a una profundidad económica, de recursos geotérmicos de baja a mediana entalpía. Para desarrollar y utilizar estos recursos en forma práctica, se necesita ejecutar las siguientes operaciones:

a. Evaluación de productos y producción de fluidos

| | Costo estimado (USD) |
|---|----------------------|
| - exploración en la superficie (geología y geofísica) | 70 000 a 85 000 |
| - captación y perforación de aguas termales | 50 000 a 700 000 |
| - pruebas físicas y químicas | 45 000 a 65 000 |

b. Estudio de factibilidad y selección de los proyectos de utilización más adecuados 40 000 a 80 000

c. Diseño y puesta en marcha de la planta

El costo de esta operación no puede estimarse, debido a las grandes diferencias que existen entre casi todos los posibles proyectos, los principales de los cuales figuran en el párrafo 7.4. En el numeral 7.4.1. se ha indicado el costo de una unidad eléctrica de 200 kW.

Tabla No. 1 Unidad de Ciclo Binario de 200 kW
 (véase la Fig.14)

| | | |
|-----|--|----------------|
| a - | flujo másico requerido: 180 t/h | |
| b - | temperatura de fluido necesaria: 100 °C | |
| c - | inversiones: | |
| | unidad generadora, dotada de bombas y conexiones con los pozos o manantiales (1500 USD/kW). Este costo puede disminuir a medida que incrementen las temperaturas (1000 USD/kW para 120 °C, 700 USD/kW para 150 °C. | 300 000 USD |
| | Transporte y montaje | 25 000 USD |
| | Obras civiles | 5 000 USD |
| | Ingeniería (para más unidades este costo se incrementa en 1/3, y su peso ponderado se reduce en cada unidad individual) | 25 000 USD |
| | Costo de inversión total (1775 USD/kW +/- 10%) | 355 000 USD(1) |
| d - | Costos de explotación: | |
| | Mantenimiento y sustitución de materiales | 12 000 USD/año |
| | Personal y capacitación | 20 000 USD/año |
| | Total de costos de explotación | 32 000 USD/año |

(1) No se ha evaluado el costo de conexión con la red eléctrica existente.

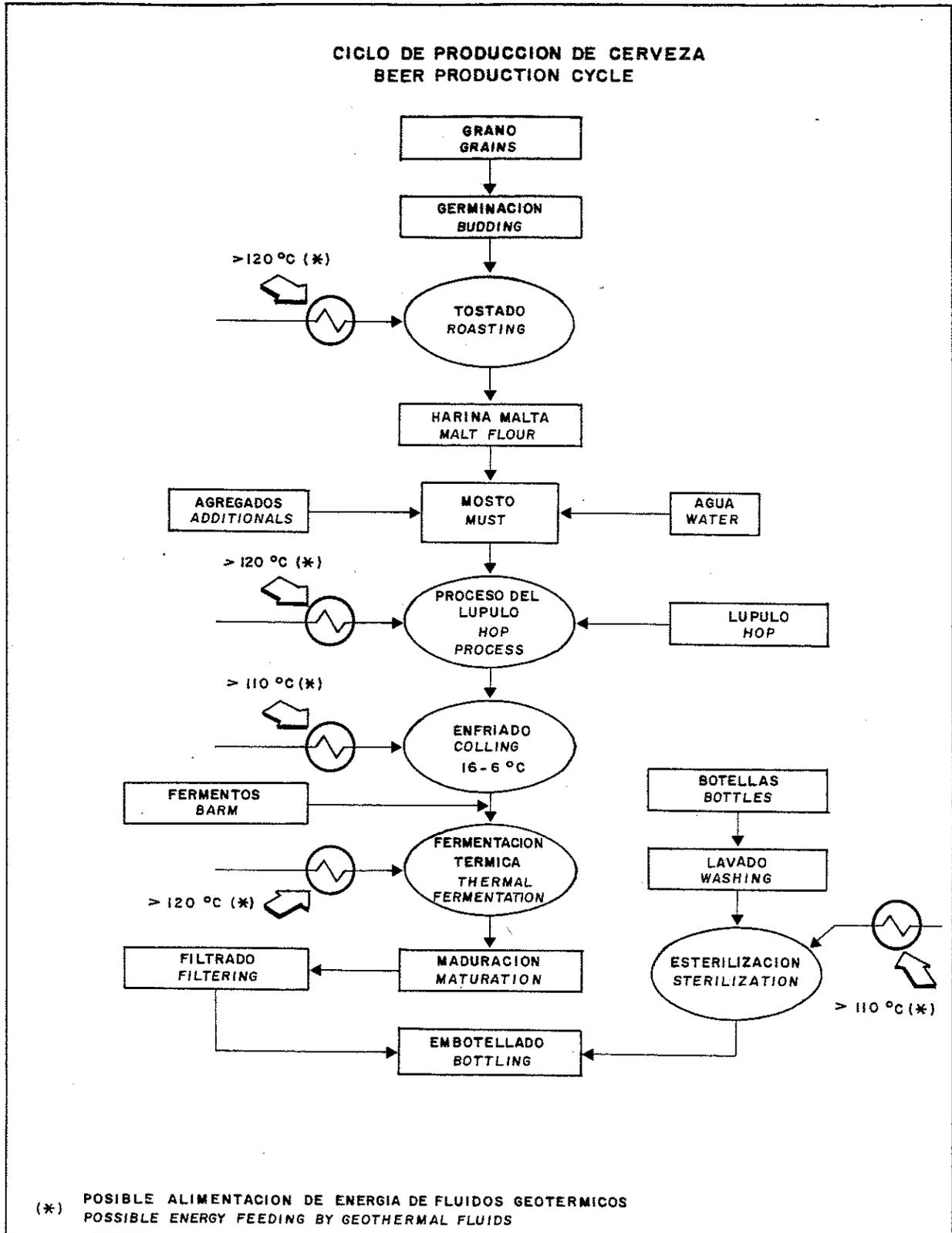
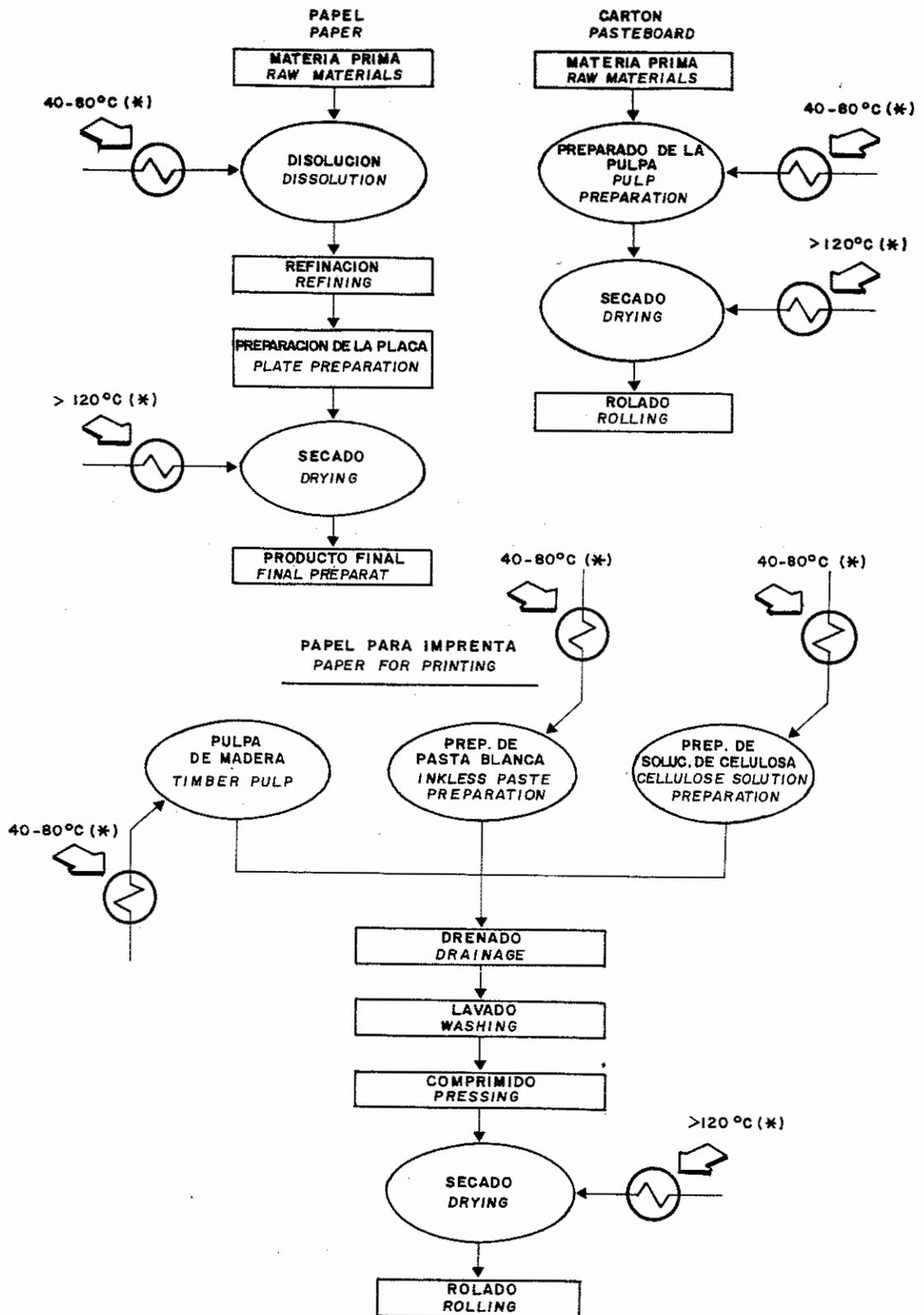


FIG. 16 POSIBLE UTILIZACION DE LA ENERGIA GEOTERMICA
(POSSIBLE GEOTHERMAL ENERGY UTILIZATION)

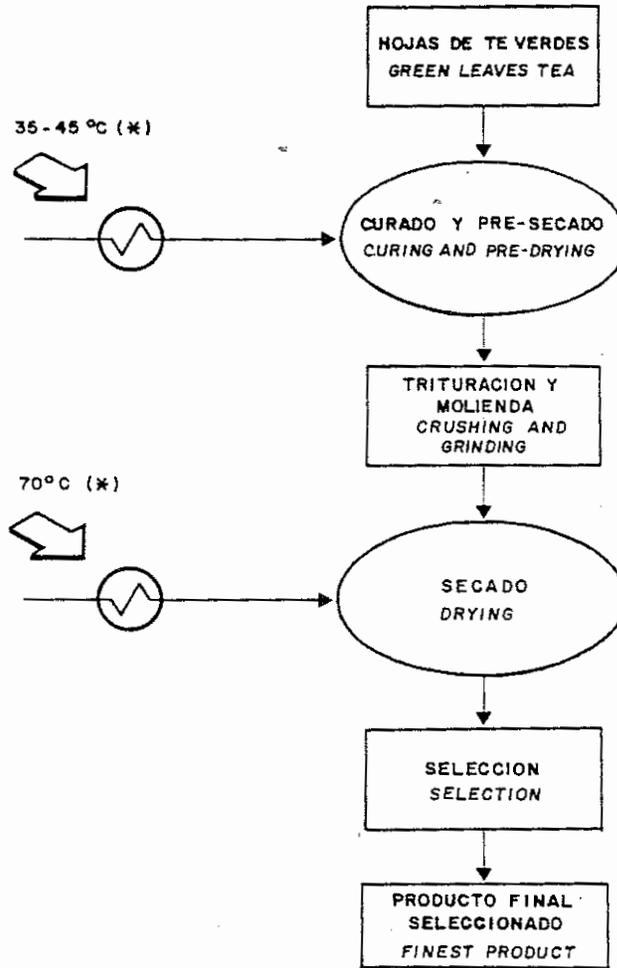
CICLO DE PRODUCCION DEL PAPEL
PAPER PRODUCTION CYCLE



(*) POSIBLE ALIMENTACION DE ENERGIA DE FLUIDOS GEOTERMICOS
POSSIBLE ENERGY FEEDING BY GEOTHERMAL FLUIDS

FIG. 17 POSIBLE UTILIZACION DE LA ENERGIA GEOTERMICA
(POSSIBLE GEOTHERMAL ENERGY UTILIZATION)

CICLO DEL CURADO DEL TE
TEA CURING CYCLE



(*) POSIBLE ALIMENTACION DE LA ENERGIA DE FLUIDOS GEOTERMICOS
POSSIBLE ENERGY FEEDING BY GEOTHERMAL FLUIDS

FIG. 18 POSIBLE UTILIZACION DE LA ENERGIA GEOTERMICA
(POSSIBLE GEOTHERMAL ENERGY UTILIZATION)

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional del Programa IRHE-BID-OLADE ha alcanzado algunos resultados muy importantes que han permitido reformular las prioridades generales de la exploración geotérmica del país. En particular ha permitido la identificación de un área de gran interés geotérmico potencial en el complejo volcánico de "El Valle de Antón".

En efecto, los datos obtenidos indican que en esta área deberían existir todos los requisitos para la existencia de un sistema geotérmico de alta entalpía:

- a. La presencia de una actividad volcánica que ha persistido desde 1,5 Ma hasta una época muy reciente (0,04 Ma) y alimentada desde una cámara magmática somera, sugieren que la caldera debería ser afectada por una anomalía térmica importante.
- b. La presencia de una situación hidrogeológica favorable, con un acuífero superficial alimentado por aguas meteóricas frías y localmente mezclado con fluidos hidrotermales profundos. La segura presencia de una buena cobertura de baja permeabilidad (conjunto conductor de la geoeléctrica), de un conjunto potencialmente permeable a profundidad económica (techo del resistivo de fondo). Además la presencia de un flujo de agua fría a baja profundidad enmascara y tapona los efectos de la subida de fluidos profundos. En estas condiciones no se pueden esperar manifestaciones termales espectaculares y los indicios geoquímicos encontrados parecen ya prometedores.

El estudio de Reconocimiento ha permitido identificar una segunda área prometedora: la de Chitira-Calobre. Aunque menos prioritaria que la de El Valle de Antón, esta área presenta buenos indicios para recursos geotérmicos de alta entalpía, como:

- a. La persistencia de una importante actividad ígnea y su reactivación en época muy reciente.
- b. Una situación hidrogeológica favorable, con una cobertura impermeable ofrecida por ignimbritas alteradas y niveles permeables por fracturación en las rocas intrusivas o lávicas del basamento Terciario.
- c. La presencia de muchas manifestaciones termales alrededor del centro eruptivo cuaternario del Cerro El Castillo que representa la zona más atractiva del área.

En la zona de Barú-Colorado, no parecen existir perspectivas para la presencia de un sistema geotérmico de alta entalpía a baja profundidad.

Las únicas perspectivas geotérmicas de alta temperatura parecen relacionadas con la posibilidad de existencia, en el interior del basamento, de zonas permeables profundas. En otras palabras todo el sistema geotérmico (reservorio y cobertura) tendría que ser alojado en el interior de las rocas del basamento. La geoquímica de los gases sugiere que tal sistema podría existir, pero con una temperatura no muy elevada (250°C) y a una profundidad desconocida. De otro lado las características geológicas e hidrogeológicas del basamento impiden suponer la existencia de niveles permeables de gran extensión vertical u horizontal.

A la luz de todas estas consideraciones la zona de Barú-Colorado se presenta como un prospecto con riesgo muy elevado para recursos geotérmicos de alta entalpía.

Agua termal, con entalpía media a baja, existen en el subsuelo de Volcán, dentro de la serie lávica reciente, a solo pocos centenares de metros de profundidad, como lo indican coherentemente datos geológicos y geoquímicos.

Para recursos geotérmicos de alta entalpía, utilizables para generación de energía eléctrica, objeto del programa de exploración IRHE-BID-OLADE, la zona de Barú-Colorado se presenta como un prospecto de riesgo muy elevado.

Considerando que los problemas principales que quedan abiertos en la exploración geotérmica de esta zona (existencia de niveles con alta permeabilidad a profundidad económica al interior del basamento) son difícilmente resueltos incluso con ayuda de métodos geofísicos, y que el programa de Reconocimiento Nacional ha identificado por lo menos otra zona (El Valle de Antón) que presenta mayores perspectivas, parece enteramente justificada la decisión de suspender las investigaciones geotérmicas en Barú-Colorado, para concentrar los recursos en un prospecto de menor riesgo.

A la luz de estos resultados de síntesis de todos los Estudios de Reconocimiento, las siguientes recomendaciones parecen ser las más apropiadas:

- a. Suspender toda actividad de exploración geotérmica en las áreas de la Isla de Coiba y de Tonosí donde pueden existir perspectivas sólo para recursos de media a baja entalpía.
- b. Dar la máxima prioridad al área de "El Valle de Antón". Para alcanzar el nivel de conocimiento de un Estudio de Prefactibilidad faltan datos de exploración directa del subsuelo a través de un(s) pozo(s) de diámetro reducido.

En consideración de los resultados proporcionados por la geofísica, el pozo ya programado (ver Informe No. 28) para alcanzar 700 m de profundidad, debería permitir una medida confiable del gradiente geotérmico. Una vez obtenidas las informaciones (litológicas, térmicas, geoquímicas) proporcionadas por este pozo, los datos disponibles deberían per-

mitir la evaluación del potencial geotérmico del área en el sentido de la probabilidad de encontrar un reservorio geotérmico de interés comercial.

- c. Alcanzar un nivel de conocimientos tipo Estudio de Prefactibilidad, también en el área de Chitra-Calobre por lo menos en lo que se refiere a los estudios geocientíficos. Esto necesita un complemento y extensión de las investigaciones geoquímicas y la ejecución de un programa de exploración geofísica en la zona más prometedora de "El Castillo". Ambas acciones han sido ya iniciadas: el estudio geoquímico adicional, recomendado por la Junta Asesora en su tercera reunión (Informe No. 23) está casi terminado y el programa de investigaciones geofísicas para "El Castillo" ha sido ya definido (ver Informe No. 36).