
BOLETIN ENERGETICO



Organización Latinoamericana
de Energía

202/1

SEPTIEMBRE/OCTUBRE, 1981

HACIA UNA IMPLEMENTACION REGIONAL LATINOAMERICANA DEL PROGRAMA DE ACCION DE NAIROBI **olade**
PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS **olade** POTENCIAL GEOTERMICO EN AMERICA LATINA **olade** EL VIENTO COMO ALTERNATIVA ENERGETICA EN AMERICA LATINA **olade** BIOGAS Y DESARROLLO EN AMERICA LATINA

POTENCIAL GEOTERMICO EN AMERICA LATINA

1. GENERALIDADES SOBRE LA ENERGIA GEOTERMICA.

- Es conveniente distinguir los recursos geotérmicos según su utilización práctica, en categorías tradicionalmente conocidas como de alta, media y baja entalpía.

Los recursos del primer grupo pueden ser utilizados para la generación de energía eléctrica, mientras los restantes son económicamente aprovechables para usos energéticos directos, tales como calefacción, agro-industria, sector sanitario, generación por medios no convencionales, etc.

Es difícil poner un límite preciso de temperatura entre los tipos de recursos, dado que la entalpía de un fluido depende, además, de la temperatura de factores físico-químicos. En general, la temperatura de 150-180°C se toma como límite inferior de los recursos de alta entalpía.

Considerando que el valor medio del gradiente geotérmico de la tierra (incremento de la temperatura en profundidad) es del orden de 30°C/Km. y que las profundidades económicamente alcanzables en la explotación geotérmica son de aproximadamente 3 Km., es posible establecer lo siguiente:

- Los recursos de baja entalpía (100°C), son teóricamente disponibles en cualquier lugar de la tierra,

siempre que existan condiciones hidrogeológicas favorables (acuíferos de gran potencialidad y profundidades adecuadas).

- Los recursos de mediana entalpía (100-150°C) y más aún los de alta entalpía (150°C), requieren de condiciones geológicas especiales, en particular la presencia de una importante anomalía térmica positiva que determine un aumento de 2 a 3 veces el gradiente geotérmico medio.

— Condiciones geológicas para el desarrollo de recursos geotérmicos de alta entalpía.

Como se ha mencionado, el primer requisito para la existencia de recursos de alta entalpía, es la presencia de una importante anomalía térmica próxima a la superficie. Para que ésto ocurra, se necesita un fuerte aumento del flujo de calor desde el interior del planeta, que determine un acercamiento a la superficie de las isoterms. Este fenómeno se puede realizar cuando haya transporte de calor hacia la superficie, a través de desplazamientos de masas a temperatura elevada. En otras palabras, es necesario que importantes volúmenes de magmas de origen subcrustal, con temperaturas del orden de 1.200°C, se movilicen hacia la superficie y transfieran el calor a las rocas encajantes. Se puede decir, por lo tanto, de manera muy general, que todas las regiones afectadas por fenómenos volcánicos recientes, se consideran zonas geotérmicas potenciales.

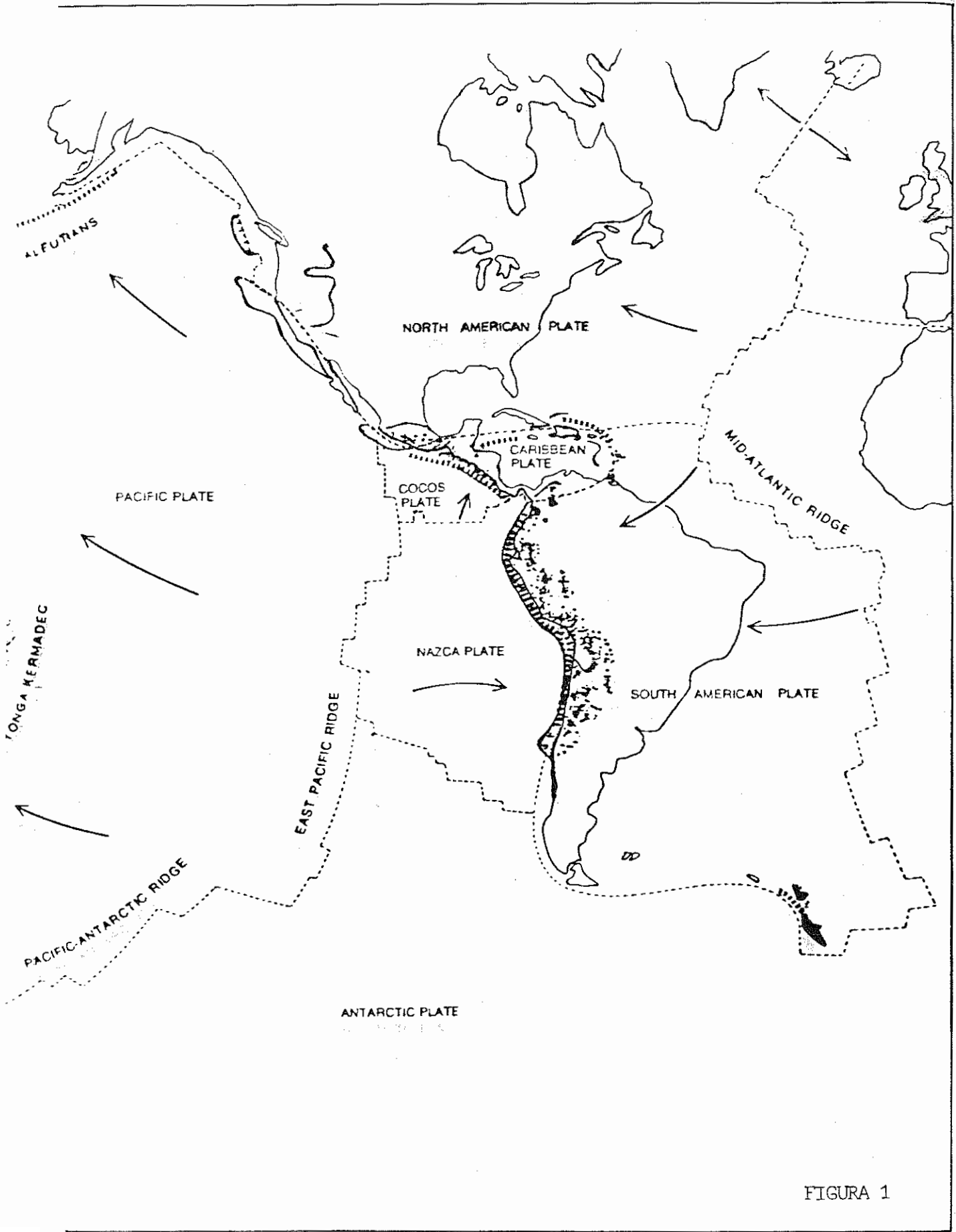


FIGURA 1

La teoría de la tectónica de placas ha permitido formular un modelo que explique de manera satisfactoria las causas que determinan la contracción de la actividad volcánica en áreas particulares del planeta. El vulcanismo, como también la actividad sísmica, representarían la disipación de la energía interna del planeta, que ocurre a lo largo de los límites de las placas contiguas.

Según el tipo de interacción dinámica entre placas, se pueden distinguir 2 tipos de límites o fronteras:

- Límites entre placas divergentes: Sería éste el ambiente tectónico de las dorsales oceánicas, donde se genera nueva litosfera por subida continua, con intrusiones y efusiones de magmas basálticos desde la atmósfera. Los continentales, como la región de los grandes lagos del Africa Oriental, representan fases embrionarias de este tipo que, en caso de continuar la distensión, seguiría su evolución hasta llegar a ser océanos.
- Límites entre placas convergentes: Es el ambiente tectónico de las cordilleras (márgenes continentales activos) y de los arcos insulares. El cinturón de fuego circumpacífico presenta los ejemplos más espectaculares de este tipo de situación geodinámica.

Estos límites están caracterizados por el fenómeno de la subducción. Una de las placas convergentes, de la naturaleza oceánica, desliza debajo de la placa adyacente, que puede ser también oceánica o, más frecuentemente, continental. En la zona de contacto se realiza un ambiente tectónico compresivo, con consecuente formación de grandes bloques de corteza aislados de sus raíces y desplazados horizontalmente. A una distancia desde el contacto, que es generalmente de por lo menos 100 Km., se desarrolla un amplio frente volcánico activo, dominado por magmas andesíticos y sus productos diferenciados. Estos magmas se generan por interacciones físico-químicas del material de la placa con la sobreyacente estenósfera. En este caso, (así como en las dorsa-

les oceánicas, a pesar de tratarse de ambientes tectónicos opuestos y caracterizados por procesos magmáticos muy diferentes), la producción, movilización y ascenso hasta la superficie, de inmensos volúmenes de magmas, determina una anomalía térmica regional y un ambiente ideal para el desarrollo de campos geotérmicos de alta entalpía.

- Límites entre placas con desplazamiento lateral: Es en este ambiente de las fallas transformes que conectan límites entre placas del primero y segundo tipo. La tectónica está controlada por desplazamientos horizontales, con un escaso componente distensivo; el vulcanismo es, por lo tanto, en general de menor intensidad y, consecuentemente, menor también en su interés geotérmico.

Si por un lado es cierto que el vulcanismo se concentra en estos 3 ambientes tectónicos, por otro, hay que mencionar que existen algunas excepciones importantes. Se trata de fenómenos volcánicos que se desarrollan en el interior de las placas, ya sea en ambiente oceánico (Hawai), o en ambiente continental (Macizo del Tibesti en Africa), lejos de los límites de las placas. Estos fenómenos se atribuyen generalmente a la presencia de "puntos calientes" relacionados con la subida concentrada en un punto de material caliente proveniente de la estenósfera. Cualquiera que sea su origen, estas zonas presentan gran interés geotérmico en el caso de que el vulcanismo se haya desarrollado intensamente en épocas recientes.

- Situación geodinámica y perspectivas geotérmicas en América Latina.

Los países latinoamericanos presentan una situación geodinámica completamente distinta, según se encuentren en el Pacífico o en el Atlántico.

Los países del Pacífico poseen los ambientes tectónicos correspondientes al segundo tipo de límite entre placas convergentes antes descritas (ver Fig. 1). El continente sudamericano corresponde a un único

gran ambiente geodinámico, caracterizado por la convergencia entre la placa oceánica de Nazca, en subducción debajo de la placa continental sudamericana; de este proceso resulta la formación de la Cordillera de los Andes, que se extiende por millares de kilómetros, desde Argentina hacia la frontera colombo-venezolana, atravesando Chile, Bolivia y Ecuador. La complejidad de los procesos geodinámicos determina en la realidad discontinuidades de breve extensión en la actividad volcánica a lo largo de la Cordillera y también una migración en el tiempo del frente volcánico. Sin embargo, los países andinos presentan una gran posibilidad geotérmica, justamente por la presencia de grandes fenómenos volcánicos que han ocurrido durante muchos millones de años.

La situación geodinámica de Centroamérica se presenta más compleja, por la existencia de una unión triple (triple función), es decir, el contacto entre 3 placas: la oceánica de cocos, las continentales norteamericanas y la del Caribe. De esta situación resulta un ambiente tectónico extremadamente complejo, caracterizado por la subducción de la placa de cocos y el desarrollo de vulcanismo andesítico a lo largo de la faja pacífica de México, Nicaragua, Costa Rica, Panamá y Honduras, al cual interesa en menor grado. Paralelamente con esos fenómenos de subducción, se desarrollan límites transformantes como los que caracterizan a los bordes septentrional y meridional de la placa del Caribe y que interesan respectivamente a Guatemala, parte de las Antillas al norte y el borde septentrional del continente sudamericano (Colombia y Venezuela al Sur).

Movimientos diferenciales en la proximidad de estas estructuras transformes, originan campos de esfuerzo y la consiguiente formación de depresiones (graben) distensivas con vulcanismo básico asociado, frecuentemente alcalino.

Las áreas de interés geotérmico corresponden, ya sea a las fajas pacíficas de vulcanismo andesítico, o a las zonas de cruce entre el frente volcánico activo y las depresiones transversales y, de menor importancia, las mismas depresiones distensivas.

En el lado atlántico de la placa caribe, se encuentra una nueva zona de subducción, causada por la convergencia entre la placa caribe misma y la placa oceánica atlántica. El resultado es la formación de un arco insular, cuyo frente volcánico activo se extiende a lo largo de las Pequeñas Antillas. Únicamente las islas que se encuentran a lo largo de este arco volcánico activo (San Kitts al Norte y Grenada al Sur), presentan un ambiente geológico potencialmente favorable para el desarrollo de recursos geotérmicos de alta entalpías.

De las demás islas del Caribe, Hispanola presenta un interés potencial de media y alta entalpía, pero limitado a la proximidad del graben Cul-de-Sac — Enriquillo, donde se encuentra el límite transformante septentrional de la placa del Caribe, y donde en efecto, se observa la presencia de fenómenos volcánicos muy limitados. Los países atlánticos del continente sudamericano, perteneciendo al margen continental "pasivo", es decir sin límites entre placas adyacentes, tienen una posibilidad geotérmica mucho menor. En estos países la probabilidad de la existencia de recursos geotérmicos de alta entalpía, es prácticamente nula y únicamente existen perspectivas para la baja o, posiblemente, mediana entalpía en el caso de que existan condiciones tectónicas e hidrogeológicas favorables (zonas distensivas que permitan la subida rápida a lo largo de fracturas de importantes cantidades de aguas calientes, desde zonas más profundas y su infiltración en acuíferos más superficiales).

— Perspectivas geotérmicas latinoamericanas

De lo antes dicho, resulta evidente que la totalidad de los países del Pacífico latinoamericano y las Pequeñas Antillas presentan importantes perspectivas geotérmicas de alta entalpía. Tratar de cuantificar, en términos de potencial energético, estas perspectivas, puede ser muy arriesgado en la fase actual de la exploración geotérmica. En efecto, no existen metodologías para una evaluación cuantitativa precisa del recurso geotérmico. La dificultad principal, consiste en la imposibilidad práctica de evaluar a priori, sin que haya sido completamente explorado

y perforado ya un campo geotérmico, la cantidad de calor presente en un volumen determinado de rocas, contenido en los fluidos geotérmicos; y, por otra parte, cuánto está contenido en rocas de permeabilidad baja o nula. Es evidente que solamente el primer tipo es aprovechable en la superficie, utilizando la tecnología disponible actualmente y, por lo tanto, únicamente éste representa el recurso energético explotable.

Las metodologías empleadas para una estimación indirecta de la fracción explotable (por ejemplo las metodologías desarrolladas por el U.S.G.S. como el método de los volúmenes, Maffler 1980), pueden proveer resultados de una cierta confiabilidad, únicamente los casos en los cuales se conozca con precisión las permeabilidades de las formaciones presentes al interior del área térmicamente anómala, y esto es en general posible únicamente después de un intenso programa de perforación y casos como éstos son todavía muy escasos en la región.

La capacidad geotermoeléctrica instalada o en proceso de instalación en los países latinoamericanos, es la siguiente:

País	Capacidad
México	150 MW
El Salvador	95 MW
Nicaragua	30 MW (proceso de instalación)

Sin embargo, hay que mencionar que la mayoría de las áreas de interés se encuentran en una fase muy preliminar de exploración, o todavía no han sido investigadas. OLADE, con la certeza de que la geotermia representa uno de los recursos energéticos más importantes de América Latina, ha dedicado en los últimos años importantes esfuerzos con el fin de valorizar dichos recursos. Después de haber establecido una adecuada metodología de exploración, OLADE ha coordinado e implementado estudios de reconocimiento y prefactibilidad en numerosos países latinoamericanos y los resultados obtenidos han sido altamente satisfactorios, los mismos que se pueden sintetizar de la siguiente manera:

Perú: Estudio de reconocimiento 1979-80; identificadas 9 áreas de interés a lo largo del Callejón Interandino, 3 de las cuales son de alta prioridad.

Ecuador: Estudio de reconocimiento 1979-80; identificadas 5 áreas de interés a lo largo del Callejón Interandino, 3 de las cuales son de alta prioridad.

Colombia: Estudio de reconocimiento 1981 en progreso; resultados preliminares indican la presencia de sus áreas de interés en los departamentos de Cauca y Nariño.

Rep. Dominicana: Estudio de reconocimiento 1979-80; identificadas una área para alta entalpía (Yayas) y varias de media a baja entalpía.

Haití: Estudio de reconocimiento 1979-80; se ha definido un área de baja a media entalpía en el graben de Cul-de-Sac.

Guatemala: Estudio de reconocimiento 1981 en progreso; se identificaron 8 áreas de interés a lo largo del eje volcánico activo y, en relación con la depresión distensiva conectada con la falla transformante del Mologua. En el área de Zunil se han realizado ya varias perforaciones profundas por parte del Gobierno.

Nicaragua: Estudio de reconocimiento y prefactibilidad 1980-81 en progreso; además de confirmar las ya conocidas, se precisó el interés de 5 áreas y, paralelamente, el estudio de prefactibilidad realizado en el área El Hoyo-San Jacinto, ha llegado a la ubicación de 3 sectores para perforación de pozos exploratorios profundos.

Grenada: Estudio geovulcanológico preliminar, 1981, en progreso; se ha definido el interés para mediana y posiblemente alta entalpía en algunas zonas de la Isla.

Jamaica: Estudio de reconocimiento orientado a la baja y media entalpía, 1981 en progreso; se evalúan las posibilidades de aprovechamiento de los recursos existentes y sus aplicaciones.

Panamá: Estudio geovulcanológico y evaluación de datos existentes en el occidente Chiriquí, 1981; se ha identificado un área para alta entalpía, con buenas posibilidades, distinta a la explorada anteriormente, ubicada en el aparato volcánico reciente Baru-Colorado.

A estos programas hay que adicionar los resultados positivos alcanzados en otros países latinoamericanos en el curso de proyecto de exploración, tales como:

Bolivia: Estudios de prefactibilidad completados, con resultados muy favorables en las zonas de Empexa y Laguna Colorada; identificación de otras numerosas áreas de interés.

Chile: Completado el programa de perforación con resultados positivos en el área de El Tatio y otras zonas de interés ya identificadas.

Argentina: Estudios de reconocimiento en la provincia de Jujuy completado, reconocimiento en la provincia de Mendoza, en progreso; 1ª fase de la prefactibilidad completada en el área del volcán Tuzgle, provincia de Jujuy; perforación de un pozo con resultados positivos en el área de Copahue, provincia de Neuquen.

Venezuela: Estudio de reconocimiento en el área de El Pilar-Casaway completado.

Costa Rica: Programa de perforaciones con resultados positivos en el área volcánica de Miravalles.

En el conjunto, la situación general es muy positiva y este hecho es una confirmación de la gran importancia de la geotermia en los países latinoamericanos y un estímulo para intensificar los estudios para la valorización de este precioso recurso energético.

2. LA METODOLOGIA DE EXPLORACION GEOTERMICA DE LA OLADE

A consecuencia del alto potencial geotérmico descrito en la parte anterior, gran número de países iniciaron sus programas de exploración geotérmica. Sin embargo, por la falta de una guía que permitiera la ejecución de los programas con el uso racional de los recursos y obtener resultados en tiempos adecuados, se consideró necesaria la elaboración de una metodología que permitiera la selección y combinación de las técnicas que contribuyan a alcanzar los objetivos particulares de la investigación, aplicables a las características geológicas particulares de cada proyecto, en vista de la amplia variedad de posibles condiciones locales que demanda cambios sustanciales en la secuencia y/o en la modalidad del uso de las técnicas existentes.

Por ello, producto de 3 seminarios con amplia participación regional entre 1978 y 1980, fue la preparación de las distintas fases de la metodología de exploración y explotación de los recursos geotérmicos. Dicha metodología comprende los lineamientos generales de un proyecto geotérmico, los métodos exploratorios a utilizarse, el personal necesario y el orden de las inversiones requeridas; todo ello flexiblemente adaptable a las condiciones y características de cada proyecto y formulado en base a las experiencias adquiridas por los proyectos geotérmicos de México, El Salvador, Italia, Nueva Zelandia, Islandia y otros países latinoamericanos, y también de acuerdo con los progresos científicos más avanzados.

En general, un proyecto geotérmico tipo se compone de 2 partes principales: la primera tiene un carácter de alto riesgo, similar a la exploración de cualquier mineral o energético, y su objetivo es la identificación del reservorio ("campo geotérmico"), incluyendo un estudio de su posible utilización; la segunda es de tipo mixto (de riesgo exploratorio, tecnológico y energético) y concierne al desarrollo y exploración del reservorio. La primera parte conlleva notables niveles de riesgo económico y debe ser enfrentada con inversiones progresivamente crecien-

te. La segunda parte, por lo contrario, implica riesgos menores pero requiere de inversiones más elevadas.

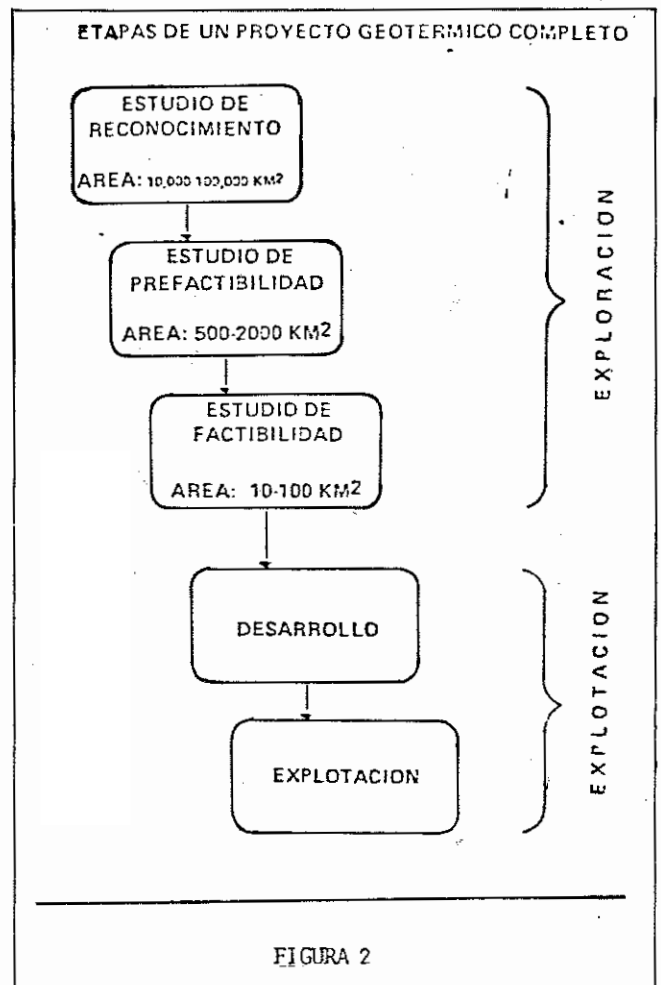
La experiencia acumulada ha demostrado que las dimensiones promedio de un área se hallan comprendidas entre 10 y 100 km². Si el proyecto geotérmico se ubica en una región del orden de 10.000-100.000 Km², la localización de la posible área requerida de etapas de investigación intermedia que permitan: primero, la delineación de la zona de interés (500-200 Km²) en base a un reconocimiento y, posteriormente, la individualización de una o más áreas prometedoras, no mayores de 100 Km², donde se ubicarán las localizaciones de los pozos exploratorios profundos que deban perforarse.

De acuerdo a lo anterior, un estudio subsecuente de prefactibilidad localizará los puntos donde se realizarán las perforaciones profundas y debe ser subdividido en distintas fases, las cuales deben realizarse en tiempos razonables, ya que las inversiones se incrementan progresivamente, a medida que avanza el proyecto. Por ello, es preciso empezar con estudios e investigaciones de carácter regional que impliquen costos relativamente bajos, dejando la prospección e investigación de mayor detalle sólo para las áreas de mayor interés y que, normalmente, se encuentran entre 500 y 200 Km².

Este criterio permite interpretar periódicamente y de manera integrada, los resultados de las investigaciones, y descartar las zonas poco favorables, así como también valorar la oportunidad de pasar a la siguiente etapa de trabajo.

Posteriormente, un estudio de factibilidad evaluará el potencial del área investigada y definirá el diseño preliminar de los sistemas de utilización alternativos, lo cual permitirá desarrollar el programa de operaciones a realizarse en la subsecuente fase de desarrollo.

Desde este punto práctico, se ha convenido articular el proyecto geotérmico en 5 etapas distintas, de las cuales las 3 primeras son: 1) Estudio de reconocimiento; 2) Estudio de prefactibilidad; y, 3) Estudio de factibilidad, las cuales se refieren a la parte exploratoria del proyecto. Las otras dos son: 4) desarrollo; y, 5) Explotación, las cuales se orientan a la producción sistemática del fluido endógeno, a su utilización industrial y a los problemas propios del campo (Fig. 2).



Este diseño estructural de la metodología permite la selección y combinación de técnicas fácilmente adaptables a las condiciones y características locales, lo mismo que distinguir efectivamente las distintas fases de exploración y explotación.

La validez de la metodología elaborada por la OLADE ha sido comprobada con gran éxito en los proyectos que ésta coordina en la región.

3. ASISTENCIA TECNICA

Dentro del programa de asistencia técnica para impulsar y desarrollar las aplicaciones de la energía geotérmica en la región, se consideró:

- Establecer una infraestructura de capacitación y entrenamiento en este campo energético, así como un intercambio sistemático, técnico y científico.
- Asesorar y coordinar trabajos de exploración geotérmica en los países que los soliciten.
- Apoyar e impulsar los desarrollos de actuales proyectos geotérmicos.
- Dar asesoría sobre áreas específicas; y,
- Buscar fuentes de financiamiento que aseguren el buen curso de los puntos anteriores.

La OLADE ha proporcionado a los países latinoamericanos asistencia y coordinación para incrementar las acciones de exploración necesarias en la búsqueda de fluidos de alta, media y baja entalpía, para fines de generación eléctrica y aplicaciones industriales.

En cuanto a la asistencia suministrada, ésta incluye desde la simple consulta sobre la formulación de proyectos, hasta encargarse de la dirección de un programa completo de exploración. Para esto, la "Metodología de Exploración Geotérmica" facilita el control de sus actividades en uno o varios países, al lograr "estandarizar" los criterios de exploración simplificando las acciones de coordinación y control necesarios.

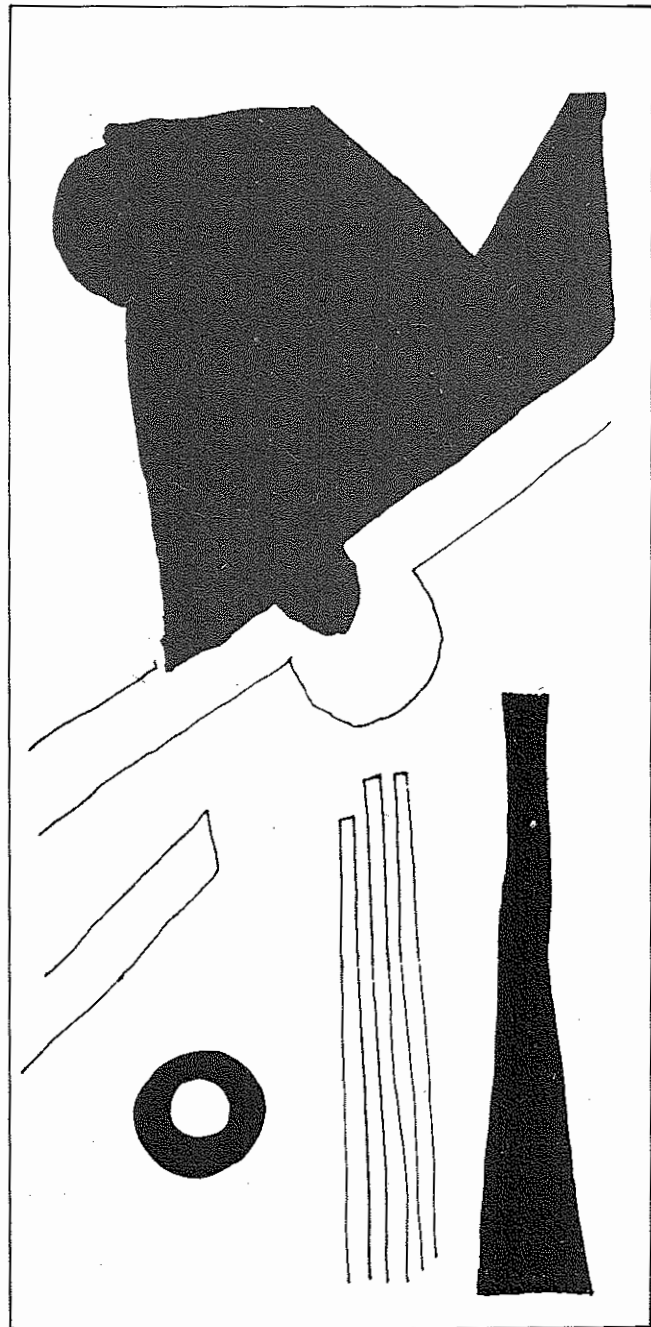
Así también la coordinación implica asistencia a países en la formación de sus cuadros profesionales. En este campo, y para tal efecto, se han establecido acuerdos con entidades regionales, a fin de capacitar técnicos en distintas disciplinas y preparar entrenamientos prácticos en los países más avanzados en actividades geotérmicas. Esto será logrado mediante la institucionalización de 6 cursos latinoamericanos sobre temas relacionados con la energía geotérmica: Geovulcanología, Geofísica, Geoquímica, Ingeniería de Producción, Perforaciones e Ingeniería de Reservorios. Los cursos han sido estructurados para llenar las necesidades fundamentales del desarrollo geotérmico de la región, se impartirán anualmente con duración aproximada de 3 meses, y con sede en distintos países. Los 2 últimos han sido ya impartidos en México, con participación de 44 profesionales originarios de 10 países.

A mediano plazo, la OLADE prevé la integración de la geotermia en el cuadro de la oferta energética en la mayoría de los países latinoamericanos. Se piensa que con los trabajos de exploración ya iniciados, se podría contar con las primeras unidades geotérmicas en el curso de la presente década, abriendo con ello las posibilidades de desarrollo intensivo de nuevas áreas que, con la producción geotermoeléctrica, se integren a la actividad productiva de los países. Dentro de este marco operativo, precisamente la OLADE ha realizado varios programas, tal como se descubre en la 1ª parte del presente.

Por otro lado, frente a la incosteable integración a las líneas de transmisión o canales de distribución energética convencional de la población rural de

América Latina, que alcanza a más de la mitad de su total, la OLADE prevé impulsar la explotación geotérmica de media y baja entalpía, hacia los logros de desarrollo productivo y económico en estas zonas de menos recursos.

Nota: En la preparación del presente artículo, se agradece la valiosa colaboración del Prof. Franco Barberi de la Universidad de Pisa y del Dr. Merla de G.I., por las discusiones conceptuales sostenidas.



ENERGY BULLETIN



Latin American Energy Organization

SEPTEMBER/OCTOBER, 1981

TOWARDS THE IMPLEMENTATION OF THE NAIROBI
PROGRAM OF ACTION IN THE LATIN AMERICAN REGION
olade SMALL HYDRO POWER STATIONS **olade** GEO-
THERMAL POTENTIAL IN LATIN AMERICA **olade** THE WIND
AS AN ENERGY ALTERNATIVE FOR LATIN AMERICA
olade BIOGAS AND DEVELOPMENT IN LATIN AMERICA

GEOHERMAL POTENTIAL IN LATIN AMERICA

1. A GEOHERMAL ENERGY OVERVIEW

It is useful to differentiate among geothermal resources according to their practical uses, in categories traditionally termed high, medium, and low enthalpy.

The resources in the first group can be used to generate electricity, while the others are economical for direct energy uses such as in heating, agro-industry, the public health sector, etc.

It is difficult to set precise temperature limits among the types of resources, given the fact that the enthalpy of a fluid also depends on the temperature of its physical-chemical factors.

In general, the range of 150-180°C is taken as the lower limit for high-enthalpy resources.

Considering the fact that the average value for the earth's geothermal gradient (temperature increase at depth) is on the order of 30°C/Km and that geothermal exploitation is economically feasible up to depths of approximately 3 Km., it is possible to establish the following:

a) The low-enthalpy resources ($\leq 100^\circ\text{C}$) are theoretically available wherever there are favorable hydrogeological conditions (aquifers with great potential and suitable depths).

b) The medium-enthalpy resources (100 - 150°C) and even more so the high-enthalpy ones ($> 150^\circ\text{C}$) require special geological conditions, particularly the presence of an important positive thermal anomaly to determine two-to three-fold increase in the average geothermal gradient.

Geological Conditions for Developing High-Enthalpy Geothermal Resources

As has been mentioned, the first pre-requisite for the existence of high-enthalpy resources is the presence of an important thermal anomaly close to the surface. For this to occur, a sharp increase in the heat flow from within the Earth is needed, to cause the isotherms to approach the surface. This phenomenon can occur when heat is transported towards the surface by means of the displacement of high-temperature masses. In other words, it is necessary for important volumes of sub-surface magma, with temperatures on the order of 1200°C to move up to the surface, transferring heat to the surrounding rocks. Therefore, it can be affirmed that, in general, all of the regions affected by recent volcanic phenomena are considered potential geothermal zones.

The tectonic plates theory has permitted the formulation of a model which satisfactorily explains the causes for contraction of volcanic activity in certain areas of the Earth. Volcanism as well as seismic activity entail the dissipation of the planet's internal energy along the border of contiguous plates.

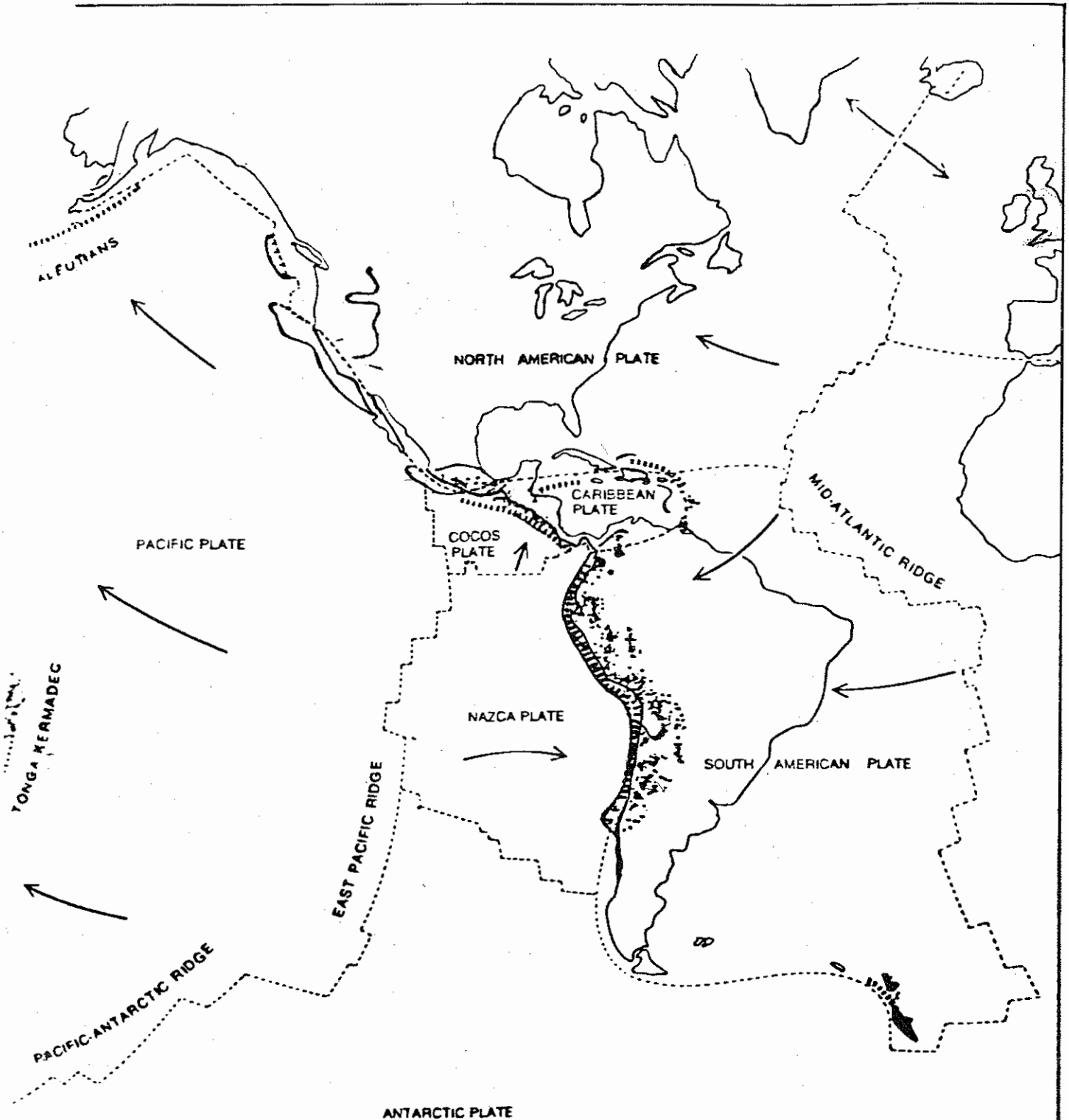


FIGURE 1

According to the type of dynamic interaction among plates, two types of borders can be differentiated:

a) Borders with diverging plates:

This refers to the tectonic environment of the dorsal ocean plates, where new lithosphere is generated through continuous raises, with intrusions and effusions of basalt magma from the atmosphere. Continental rifts, such as those of the region of large lakes in Eastern Africa, represent embryonic phases of this type. Should their distension be continued, their evolution would continue until they become oceans.

b) Border between converging plates:

This refers to the tectonic environment of the cordilleras (active continental margins) and island chains. The Circumpacific Belt of Fire offers some of the most spectacular examples of this type of geodynamic situation.

The limits are characterized by subduction. One of the converging oceanic plates slides under the adjacent plate, which could be either oceanic or, more often than not, continental. In the contact zone, a compressive tectonic environment evolves, with the consequent formation of large blocks of crust isolated from its roots and displaced horizontally. At some distance from the point of contact—usually at least 100 Km.— an extensive front of active volcanism develops, where andesitic magma and its differentiated products prevail. Such magma is generated by physical-chemical interactions between the material of the plate and the overlaid stenosphere. In this case (as in that of the ocean dorsal plates, despite the fact that these are opposite tectonic environments characterized by quite different magmatic processes), the production, mobilization, and rise to the surface of enormous volumes of magma produce a regional thermal anomaly and an ideal setting for the development of high-enthalpy geothermal fields.

c) Border between plates with lateral displacement

It is in this environment that transforming faults connect the first two types of plate borders. The tectonics are controlled by horizontal displacement, with only a light distensive component. The volcanism is, therefore, generally less intense and; as a result, its geothermal prospects are less interesting.

While on the one hand it is true that volcanism is concentrated in these three environments, it should also be noted that there are some important exceptions. These are volcanic phenomena evolved inside the plates, whether these are found in oceanic settings (Hawaii) or in continental ones (Tibesti mountains in Africa), far from the limits of the plates. These phenomena are generally attributed to the presence of "hot points" related to the rise concentrated at a point with hot material originating in the stenosphere. No matter what their origin, these zones offer great geothermal interest when the volcanism has developed with sufficient intensity in recent times.

The Geodynamic Situation and Geothermal Prospects in Latin America

The geodynamic situation of the Latin American countries is quite different from those of the Atlantic and Pacific.

The Pacific countries have the second type of tectonic environments described above, with converging plates (see Figure 1). The South American continent corresponds to one large geodynamic setting, characterized by conversions between the oceanic plate of Nazca, in subduction below the South American continental plate, resulting from this process, the formation of the Andean Cordillera, which extends for thousands of kilometers, from Argentina up to Colombian-Venezuelan border, passing through Chile, Bolivia and Ecuador. The complexity of the geodynamic processes currently gives rise to short discontinuities in volcanic activity

along the Cordillera and also to a migration of the volcanic front with time. Nevertheless, the Andean countries offer great geothermal possibilities, precisely because of the presence of extensive volcanic phenomena occurring over many millions of years.

The geodynamic situation in Central America is much more complex, due to the existence of a triple function, in other words, contact among three plates: the Oceanic Cocos plate, and the continental North American and Caribbean ones. This situation produces an extremely complex tectonic environment, characterized by the subduction of the Cocos plate and the development of andesitic volcanism along the Pacific Strip of Mexico, Nicaragua, Costa Rica, Panama and Honduras, of much less interest. Along with this subduction phenomena transforming limits, such as those which characterize the septentrional and meridional border of the Caribbean plate, have evolved; these include Guatemala, part of the Northern Antilles, and the septentrional edge of the South American Continent (Colombia and Southern Venezuela), respectively.

Differential movements near these structures, give rise to force fields and the consequent formation of distensive depressions (grabens) with basic associated volcanism, frequently alkaline.

The areas of geothermal interest correspond, either to the Pacific strips of andesitic volcanism, or to intersecting zones between the active volcanic front and the transversal depressions, and to a lesser degree, the distensive depressions themselves.

On the Atlantic side of the Caribbean plate, there is an area of recent subduction, caused by the convergence of the Caribbean plate and that of the Atlantic ocean. The result was the formation of an island chain, whose active volcanic front extends along the Lesser Antilles. Only those islands located along this active volcanic arch (St. Kitts to the North and Grenada to the South), offer a potentially favorable geological setting for the development of high-enthalpy geothermal resources.

Among the remaining Caribbean islands, Hispaniola is potentially interesting in terms of medium and high enthalpy, but only near the graben Cul-de-Sac, Enriquillo, at the transforming septentrional limit of the Caribbean plate where very limited volcanic phenomena are present. The Atlantic countries of South America belong to the "passive" side of the continent, i.e., that without limits between adjacent plates. Their geothermal possibilities are much slighter. In these countries, there is almost no chance that high-enthalpy geothermal resources exist; although there are some prospects for low-or possibly medium-enthalpy fluids wherever there are favorable tectonic and hydrogeological conditions (distensive zones permitting rapid rise of important volumes of hot water, along the fracture from deeper zones, and their infiltration into aquifers closer to the surface).

Latin American Geothermal Prospects

From the foregoing, it becomes evident that all the Latin American countries with a Pacific coast and the Lesser Antilles have good possibilities for high-enthalpy geothermal resources. Any attempt to quantify these in terms of their energy potential could be quite risky in this current stage of geothermal exploration. Actually, there are no methodologies for accurately evaluating geothermal resources quantitatively. The main difficulty consists of the practical impossibility of an *a priori* evaluation of the amount of heat present in a given set of rocks containing geothermal fluids before the field has been explored and drilled. Neither can one know how much fluid is contained in rocks having a low or null permeability. With the technology currently available, fluids such as the latter cannot be exploited from the surface; and, therefore, the other constitute the only exploitable energy resource.

The methodologies used to estimate the exploitable portion indirectly (e. g., the methodologies developed by the United States Geological Service —U.S.G.S.— such as the volumes method, Maffler 1980) can provide fairly reliable results in those

cases where one accurately knows about the permeability range of the formations within the thermal anomaly; this is usually only possible after an intense drilling program, a phenomenon still quite limited in the region.

The Latin American geothermoelectric capacity (installed or underway) is as follows:

Country	Capacity
Mexico	150 MW
El Salvador	95 MW
Nicaragua	30 MW (in progress)

However, it should be noted that most of the areas of interest are in a quite preliminary phase of exploration or have yet to be investigated. In recent years, OLADE —with the certainty that geothermics represents one of Latin America's most important sources of energy— has dedicated major efforts to the assessment of such resources. After having established a suitable exploration methodology, OLADE has coordinated reconnaissance and prefeasibility studies in numerous Latin American countries; and the results obtained have been highly satisfactory. They can be summarized as follows:

Peru	Reconnaissance study, 1979-80; identification of 9 areas of interest along the Inter-andean Depression, 3 of which have top priority.
Colombia:	Reconnaissance study, 1981 (in progress); preliminary results indicate presence of areas of interest in the areas of Cauca and Nariño.
Dominican Republic:	Reconnaissance study, 1979-80; one high-enthalpy area (Yayas) identified and as well as several of low-to-medium enthalpy.
Haiti:	Reconnaissance study, 1979-80; definition of a low-to-medium enthalpy area in the Cul-de-Sac graben.

Guatemala: Reconnaissance study, 1980 (in progress); identification of 8 areas of interest along the active volcanic axis and related to the distensive depression related to the Mologua transforming fault. In the area of Xunil, several deep boreholes have been drilled by the Government.

Nicaragua: Reconnaissance and pre-feasibility study, 1980-81 (still in progress), in addition to confirming those areas of interest already known, 5 more were detected; parallelly, a pre-feasibility study carried out in the El Hoyo-San Jacinto area has located 3 sectors where deep exploratory wells will be drilled.

Grenada: Preliminary geovolcanological study, 1981 (in progress); definition of medium and possibly high-enthalpy interests in some parts of the island.

Jamaica: Reconnaissance study oriented to low- and medium-enthalpy, 1981 (in progress); evaluation of the possibilities for developing and applying the existing resources.

Panama: Geovolcanological study and evaluation of existing data on the western Chiriqui, 1981; identification of one high-enthalpy area with good possibilities, quite different from that previously explored in the recent volcanic apparatus Baru-Colorado.

To these programs, one must also add the positive results achieved in other Latin American countries where exploration is underway:

Bolivia: Completed pre-feasibility studies, with quite favorable results, in the areas of Empexa and Laguna Colorada; identification of many other areas of interest.

- Chile:** Drilling program completed with positive results in the area of El Tatio and other areas of interest already identified.
- Argentina:** Reconnaissance studies in the province of Jujuy (completed), in the province of Mendoza (in progress); first phase of pre-feasibility completed in the area of the Tuzgle volcano, in the province of Jujuy; drilling of one well with positive results in the Copahue area, in the province of Neuquen.
- Venezuela:** Reconnaissance study in El Pilar-Casamay (completed).
- Costa Rica:** Drilling program with positive results in the volcanic area of Miravalles.

As a whole, the situation is very positive and this fact not only confirms the great importance of geothermal energy in the Latin American countries but also provides an incentive for intensifying studies to assess this invaluable energy resource in the region.

2. OLADE METHODOLOGY FOR GEOTHERMAL EXPLORATION

As a consequence of the high degree of geothermal potential described in Section 1, many countries have undertaken geothermal exploration programs. Nevertheless, there was no guide permitting the execution of the programs with a rational use of the resources and yielding within suitable time limits. The wide variety of possible local conditions require substantial changes in the sequence and/or modality of the use of existing techniques. Thus, it was considered necessary to elaborate a methodology allowing techniques to be selected and combined so as to aid in accomplishing the particular research objectives for the specific geological characteristics of each project.

Thus, as the result of 3 seminars between 1978-80, with broad regional participation, the

different phases of a geothermal exploration and exploitation methodology was prepared. This methodology includes the general guidelines for a geothermal project, the exploratory methods to be used, the number of personnel and the magnitude of the investments required, etc., all this flexibly adaptable to the conditions and characteristics of each project and formulated on the basis of experience acquired in geothermal projects in Mexico, El Salvador, Italy, New Zealand, Iceland, and other Latin American countries, and in accordance with the latest scientific advances.

In general, a typical geothermal project is composed of two main parts: the first is high-risk, like the exploration of any mineral or form of energy; its purpose is to identify the reservoir (the geothermal field), including the study of its possible utilization. The second is of a mixed type (exploratory, technological, and energy risks), related to the development and exploitation of the reservoir. The first part entails notable levels of economic risk and requires progressively larger investments. On the other hand, the second part requires lower risks and investment of substantial sums.

The experience accumulated thus far has shown that the average dimensions of a productive area range between 10 and 100 Km². If the geothermal project is located in a region on the order of 10,000-100,000 Km², the locating of the possible productive area will require intermediate investigation phases permitting: first, the definition of the area of interest (500-2000 km²) on the basis of reconnaissance and, later, the singling out of one or more promising areas no larger than 100 Km², wherein sites will be determined for the deep exploratory wells to be drilled.

In accordance with the foregoing, a subsequent pre-feasibility study will locate the sites for deep drilling. The phase should be broken down into different stages to be accomplished within reasonable time periods, since investments are progressively larger as the project advances. Thus, it is imperative

to initiate studies and investigations of a regional nature, which entail relatively low costs, while leaving the more in-depth prospecting and investigation for only those areas of major interest, usually 500-2000 Km².

This criteria permits the periodical, integrated interpretation of the investigation results; the elimination of less favorable zones; and the assessment of the merits of proceeding to the next stage of work.

Later, a feasibility study evaluates the potential of the area investigated and defines the preliminary design of the alternative utilization systems, thus permitting the programming of the operations to be undertaken during the subsequent phase of development.

From the practical point of view, it has been useful to formulate 5 different stages for a geothermal project. The first three are related to the exploratory part of the project: the reconnaissance, pre-feasibility, and feasibility studies. The other two phases, development and exploitation, are oriented to the systematic production of the endogenous fluid, to its industrial application, and to the problems proper to the field (Figure 2).

This structural design of the methodology permits the selection and combination of techniques easily adaptable to local conditions and characteristics, and effectively differentiates among the various phases of exploration and exploitation.

The validity of the OLADE methodology has been successfully proven in the regional projects coordinated by this Organization.

3. TECHNICAL ASSISTANCE

Within the program of technical assistance to foster the development of regional applications for geothermal energy, the following actions were considered:

- To establish a training infrastructure in this field, along with a systematic technical-scientific exchange;
- To advise in and coordinate the geothermal exploration projects in those countries which may so request;
- To support and encourage the development of geothermal projects already underway;
- To provide consulting services in specific areas and;
- To seek sources of financing to assure the development of the foregoing.

OLADE has provided assistance and coordination to the Latin American countries so as to increase the necessary exploratory activities in the search for low-, medium-, and high-enthalpy fluids for electricity generation and industrial applications. The assistance lent has included everything from simple consultations in the formulation of projects, to the directing of a complete exploration program. For this, the Geothermal Exploration Methodology has facilitated the control of activities in one or more countries by managing to "standardize" exploration criteria by simplifying their control and coordination.

Likewise, the coordination efforts have entailed assistance in the formation of national professional teams. In this regard, agreements have been established with regional entities, for the purpose of training technicians in different disciplines and for preparing practical training in those countries most advanced in geothermal activities. It has been thought to accomplish this through the institutionalization of six Latin American courses on topics related to geothermal energy; Geovolcanology, Geophysics, Geochemistry, Production Engineering, Drilling, and Reservoir Engineering. The courses have been structured to meet the basic needs of regional geothermal development; they will be offered on a yearly basis, in different countries, and will last approximately three months each. The latter two have already been given in Mexico, with the participation of 44 professionals from 10 countries.

OLADE anticipates geothermics to be integrated into the medium-term energy supply of most of the Latin American countries. It is thought that with the exploration already begun, the first geothermal units will be available during this decade, thus opening up possibilities for the intensive development of new areas which, with geothermoelectric generation, will be integrated into national productive activities. Within this operational framework, OLADE has carried out several programs, as indicated in the first part of this article.

Furthermore, by integrating the rural populations of Latin America, which account for more than half of the total, with transmission lines or conventional energy distribution grids, OLADE hopes to foster the exploitation of low- and medium-enthalpy geothermal resources in an attempt to increase productive and economic development in these areas with fewer resources.

note: The authors would like to gratefully acknowledge the valuable contributions made by Prof. Franco Barberi from the University of Pisa and by Dr. Andrea Merla from G. I. through conceptual discussions held during the preparation of this Article.

