



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**APUNTES DEL TEMA GEOTERMIA DE LA
ASIGNATURA GEOLOGÍA DE EXPLOTACIÓN
DEL PETRÓLEO, AGUA Y VAPOR**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA GEÓLOGA

PRESENTA

**CLAUDIA BERENICE MARTÍNEZ
SAFORA**

DIRECTOR: ING JAVIER ARELLANO GIL



CIUDAD UNIVERSITARIA

2009

INDICE	Página
--------	--------

RESUMEN	1
---------	---

CAPÍTULO I CONCEPTOS FUNDAMENTALES

I.1 Introducción.....	3
I.2 Objetivo.....	4
I.3 El calor terrestre y el flujo calorífico.....	5
I.4 Importancia de la energía geotérmica.....	11
I.5 Distribución mundial de los campos geotérmicos.....	12

CAPÍTULO II CAUSAS DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA EN EL SUBSUELO

II.1 Gradiente geotérmico natural.....	16
II.2 Causas de origen radiométrico.....	20
II.2.1 Desintegración alfa.....	21
II.2.2 Desintegración beta.....	21
II.2.3 Emisión de rayos gamma.....	22
II.2.4 Principales elementos productores de energía radiactiva....	23
II.3 Causas de origen mecánico.....	24
II.4 Causas de origen magmático.....	28
II.5 Causas de origen químico.....	37

CAPÍTULO III CLASIFICACIÓN Y EXPLORACIÓN DE LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS

III.1 Generalidades.....	39
III.2 Clasificación de los campos geotérmicos.....	44
III.2.1 Sistemas geotérmicos convectivos.....	44
III.2.2 Sistemas geotérmicos conductivos.....	45
III.2.3 Sistemas marinos.....	47
III.2.4 Sistemas magmáticos.....	47
III.3 Exploración de los campos geotérmicos.....	48
III.3.1 Métodos geológicos.....	50
III.3.2 Métodos hidrogeológicos.....	52
III.3.3 Métodos geoquímicos.....	53
III.3.4 Métodos geofísicos.....	55
III.3.4.1 Mediciones infrarrojas.....	55
III.3.4.2 Mediciones superficiales de temperatura y flujo de calor.....	56
III.3.4.3 Mediciones gravimétricas.....	58
III.3.4.4 Mediciones geoelectricas.....	59
III.3.4.5 Métodos sísmicos.....	61
III.3.4.6 Métodos magnetométricos.....	63

CAPÍTULO IV APLICACIONES Y USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

IV.1 Generalidades.....	66
IV.2 Producción de electricidad.....	73
IV.3 Balneología.....	77

IV.3.1 Tequisquiapan, Querétaro.....	78
IV.3.2 Santa María del Río, San Luis Potosí.....	80
IV.3.3 Los Azufres, Michoacán.....	82
IV.3.4 Tonicato, Estado de México.....	83
IV.3.5 Santa María Amajac, Hidalgo.....	86
IV.4 Calefacción.....	89
IV.5 Agricultura y ganadería.....	92
IV.6 Usos industriales.....	93
IV.7 Depósitos minerales.....	94
IV.7.1 Caopas, Zacatecas.....	98
IV.7.2 Naica, Chihuahua.....	99
IV.8 Otros posibles usos de la energía geotérmica.....	100

CAPÍTULO V ZONAS Y YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS EN MÉXICO

V.1 Consideraciones generales.....	103
V.2 Zonas geotérmicas en México.....	107
V.2.1 Cresta oceánica activa del Golfo de California y Sistema de Fallas San Andrés.....	110
V.2.2 Sistema de fallas de la Sierra Madre Occidental.....	113
V.2.3 Faja Volcánica Transmexicana.....	114
V.2.4 Cadena Volcánica Centroamericana.....	116
V.2.5 Sistema de fallas Motahua-Polochic.....	116
V.2.6 Arco magmático peripacífico del sur de México.....	117
V.2.7 Sierra Madre Oriental.....	117
V.2.8 Planicie costera del Golfo de México.....	118
V.2.9 Rift del Río Bravo.....	118

V.3 Yacimientos geotérmicos en México.....	119
V.3.1 Cerro Prieto, Baja California.....	120
V.3.2 Los Azufres, Michoacán.....	124
V.3.3 Los Humeros, Puebla.....	128
V.3.4 Las Tres Vírgenes, Baja California Sur.....	131
V.3.5 Cerritos Colorados, Jalisco.....	134
V.4 Situación actual.....	135
CONCLUSIONES.....	137
RECOMENDACIONES.....	138
BIBLIOGRAFÍA.....	139

INTRODUCCIÓN

La geotermia se refiere al calor proveniente del interior de la Tierra, sin embargo, en la práctica se denomina geotermia al estudio y utilización de la energía térmica que, transportada a través de la roca y/o fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia la superficie dando origen a los sistemas geotérmicos.

Aun y cuando la geotermia ha existido siempre, no fue sino hasta principios del Siglo XX que empezó a utilizarse de forma comercial, haciéndose notoria su existencia hace apenas tres décadas, y con el incremento en el costo de los combustibles fósiles en la década de los setenta, se le dio una importancia relevante, contribuyendo en parte a solucionar los requerimientos de energía de algunos países. Actualmente en México, la energía geotérmica no se considera como un recurso que cubra la demanda de energía para el futuro, más bien se le considera un recurso que contribuye mínimamente a cubrir esa demanda, ya que es explotable económica y técnicamente, limpio, flexible, confiable y con una gran variedad de aplicaciones, entre las que se encuentran: generar electricidad, enfriar o calentar espacios habitacionales, producir diversas materias primas, en balneología, turismo, invernaderos, criaderos de peces y mariscos, así como en procesos industriales y de manufactura.

En este trabajo, se aborda el tema de la geotermia de una forma general, dejando fuera, aspectos que no conciernen al objetivo principal de este compendio, que es el de proporcionar a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Petrolera, material bibliográfico actualizado en español, que les sea de utilidad en la Asignatura Geología de Explotación del Petróleo, Agua y Vapor, ya que el tema de Geotermia forma parte del temario de la asignatura. Pero además, se busca crear una conciencia sobre la importancia de considerar ya a la geotermia como una de las fuentes alternas de energía que pueden satisfacer una parte importante de la demanda de energía en México, sobre todo porque es un país que no sólo cuenta con los recursos naturales, sino con la tecnología y los recursos humanos para obtener un óptimo aprovechamiento.

Se desarrollan todos los temas y subtemas del temario, con ejemplos y aplicaciones, de tal manera que los estudiantes tendrán material de consulta o complemento, a la información desarrollada por el profesor.

En el Capítulo I, se explican conceptos fundamentales en los que se apoya la geotermia, tales como el calor terrestre, el gradiente geotérmico, flujo calorífico, entre otros; se muestra además, la distribución mundial de los campos geotérmicos y los factores que controlan dicha distribución. Por otra parte, de manera general, se mencionan los diversos usos de la energía geotérmica, así como los métodos de exploración que existen para su aprovechamiento.

En el Capítulo dos, se exponen las causas que estimulan el incremento de temperatura en el subsuelo, las cuales pueden ser de origen radiométrico, de origen mecánico, de origen magmático y/o de origen químico, se describen las características y propiedades principales de cada una de las ellas.

En el Capítulo tres, se trata lo relacionado a la clasificación de los campos geotérmicos, al mismo tiempo, su exploración y su explotación, cuáles podrían ser los posibles objetivos que se deberían plantear al iniciar un trabajo de exploración, además, los métodos que se usan para detectar la presencia de calor en el interior o incluso el exterior de la superficie de la Tierra; así se encuentran los métodos geológicos, hidrogeológicos, geoquímicos y geofísicos, los cuales se describen con sus principales características, su modo de aplicación y se muestran dos ejemplos de su aplicación en México.

En el Capítulo cuatro, se presentan los usos y aplicaciones de la energía geotérmica, dónde se usa, cómo se aplica, los intervalos de temperatura asociados al empleo que se le da, se citan algunos ejemplos de México y el mundo.

Por último, en el Capítulo cinco, se hace una revisión de lo que se tiene en la República Mexicana, en dónde se han registrado manifestaciones termales, asimismo, se describen las características principales de los yacimientos de México, así como la situación actual en nuestro país.

CAPÍTULO I CONCEPTOS FUNDAMENTALES

I.1 INTRODUCCIÓN

La demanda de energía en el mundo es cada vez mayor a medida que la población aumenta y la sociedad busca mejores niveles de vida; la combinación de crecimiento demográfico y desarrollo económico, que incluye la industrialización en el mundo entero, implica que el consumo mundial de energía continuará aumentando. Debido a estas tendencias, cada día se hace un uso más intensivo de la energía a partir de los combustibles fósiles para producir energía eléctrica, combustibles para el transporte y para la industria. En los escenarios a corto, mediano y largo plazo, hay un uso irracional de petróleo, gas natural y carbón, por lo que se prevé que no se podrá satisfacer completamente la demanda de los próximos 10, 20 y 50 años. Actualmente a nivel mundial se consumen cada año más de 60 mil millones de barriles de petróleo para atender las demandas energéticas, principalmente para la generación de energía eléctrica. Esta energía es la que proporciona una gran versatilidad en cuanto a su uso, pero su proceso de generación a partir de combustibles fósiles es poco eficiente y conlleva impactos negativos al medio ambiente. Además, las reservas de combustibles fósiles son finitas: cuanto más se utilicen más rápido se agotarán (Mercado, et al., 2007).

A manera de ejemplo, en las dos próximas décadas la India proyecta triplicar, y China duplicar, la utilización de carbón para consumo de electricidad, seguidos por varios países más. Esto significa que la contaminación del medio ambiente seguirá en aumento en todos los países del mundo, incluida la emisión de gases de efecto invernadero.

En este contexto, la energía geotérmica es una energía renovable, limpia, tanto para generar electricidad como para otros variados usos, directos e indirectos. En México su uso comercial para producir energía eléctrica aunque a pequeña escala, es un éxito, teniendo una capacidad instalada de 958 MW, y es bien conocido que abundan en varios sectores de la República Mexicana los recursos geotérmicos de moderada y baja temperatura que se utilizan para otros fines. Como ésta, se tienen otras fuentes de energía renovables y que no causan impacto ambiental, como la solar y la eólica, sin embargo éstas aún están en desarrollo o está iniciando su explotación (Mercado, et al., 2007).

La Geotermia es la disciplina científica que se encarga del estudio de las variaciones de temperatura dentro de la corteza terrestre y los fenómenos naturales que de alguna manera influyen sobre la distribución de los flujos térmicos. Por otro lado, la energía es la capacidad para realizar un trabajo y el calor por sí mismo es una fuente de energía, por lo tanto, literalmente la energía geotérmica es el calor contenido en la Tierra que, a su vez, puede

generar fenómenos geológicos que tienen que ver con el gradiente geotérmico en el planeta; dicha energía está distribuida regularmente en toda la Tierra. Aún cuando esta energía se dispersa, sobre todo en la corteza terrestre, existen regiones bien delimitadas de ella donde los flujos de energía presentan valores anómalos. El aprovechamiento económico de este tipo de energía se basa en la detección y evaluación de las zonas anómalas a través del estudio científico del subsuelo. En la prospección de yacimientos geotérmicos, se emplean métodos geológicos, geoquímicos y geofísicos; la forma de explotación de un yacimiento geotérmico depende esencialmente del volumen, la temperatura del agua y el uso que se le dará.

1.2 OBJETIVO

El objetivo primordial de este trabajo es elaborar material didáctico que sirva de apoyo para el tema de Geotermia en la asignatura de Geología de Explotación de Petróleo, Agua y Vapor, de la carrera de Ingeniería Petrolera, en su capítulo 8 cuyo contenido es:

8. Geotermia

Objetivo: El alumno conocerá y explicará las principales características geológicas de los yacimientos geotérmicos. Conocerá la metodología que se usa en la evaluación de áreas de interés geotérmico.

8.1 Conceptos fundamentales.

8.2 Causas del incremento de temperatura en el subsuelo.

8.3 Clasificación de los campos geotérmicos.

8.4 Aplicaciones y usos de la energía geotérmica.

8.5 Zonas y yacimientos de México.

Se elaborará y desarrollará un temario más adecuado que sirva de base para el estudio de este tema.

La meta a alcanzar al concluir este compendio, es la de integrar la información sobre el tema de geotermia, basados en el temario, y de esta manera, cumplir con el objetivo planteado en el mismo. Además, poner a disposición de quien lo requiera, esta recopilación, ya que a nivel nacional no existe una amplia bibliografía actualizada en español que incluya los diversos temas que aquí se tratan. Conjuntamente mostrar una fuente de energía alterna que en México es muy importante y que ya debería ser aprovechada al máximo, debido a que ofrece muchas ventajas sobre todo porque este país, además de contar con el recurso geotérmico, tiene una demanda importante de energía que en poco tiempo no podrá satisfacerse con los combustibles fósiles que se están agotando.

I.3 EL CALOR TERRESTRE Y EL FLUJO CALORÍFICO

Todos los procesos geodinámicos que suceden en la Tierra son controlados por la transferencia y generación de calor en su interior. Desde los procesos más superficiales, hasta los volcanes, intrusiones ígneas, terremotos, formación de cordilleras y metamorfismo.

El calor es el motor de la Tectónica de Placas, que involucra la litósfera y la astenósfera, y otros procesos a mayor profundidad, como los movimientos de convección en el manto y en el núcleo externo. El campo magnético de la Tierra tiene su origen en los procesos de convección del núcleo externo, por lo que está estrechamente relacionado con el calor interno.

La presencia de volcanes, fuentes de calor en la corteza terrestre y otros fenómenos termales llevaron a nuestros ancestros a intuir que algunas partes del interior de la Tierra eran calientes, sin embargo, no fue sino hasta el período comprendido entre el Siglo XVI y XVII cuando las primeras minas fueron excavadas a varios cientos de metros bajo la superficie de la Tierra y que los mineros dedujeron por las simples sensaciones físicas, que la temperatura de la Tierra se incrementaba con la profundidad (Dickson y Fanelli, 2004).

Según Dickson y Fanelli (2004) en su trabajo *¿Qué es la energía geotérmica?*, las primeras medidas con termómetro en las rocas de la Tierra fueron probablemente tomadas en 1740 por De Gensanne en una mina cerca de Belfort, en Francia. En 1870, los modernos métodos científicos de ese tiempo fueron usados en el estudio del régimen térmico de la Tierra, pero no fue sino hasta el Siglo XX que se descubrió el papel que juega el calor radiogénico, con lo que se pudieron comprender varios fenómenos como el equilibrio de calor en la historia termal de la Tierra. Todos los modelos modernos térmicos de la Tierra en realidad tienen que considerar el calor que continuamente se genera por el decaimiento de los isótopos radiactivos de uranio (U^{238} , U^{235}), torio (Th^{232}) y potasio (K^{40}), los cuales están presentes en la corteza terrestre, el manto y el núcleo. Se estima que cerca del 50% del flujo total de calor procede de la desintegración de isótopos radiactivos de vida larga presentes en la corteza y el manto; estos son principalmente los isótopos U^{235} , U^{238} , Th^{232} y el K^{40} .

Además del calor radiogénico que está distribuido en proporciones inciertas, son otros los recursos potenciales de calor más evidentes, tales como el calor generado por la actividad magmática y el que aportan los factores mecánicos que finalmente conservan un cierto equilibrio con el calor que se “pierde” con los procesos dinámicos del planeta.

En cualquier modelo térmico de la Tierra, también se debe considerar el calor inicial, es decir, la energía liberada durante la formación de la Tierra,

hace 4500 millones de años, y que todavía está llegando a la superficie, los movimientos diferenciales, que es la energía liberada entre las distintas capas que constituyen la Tierra (principalmente entre manto y núcleo) y el calor latente de cristalización del núcleo externo (Dickson y Fanelli, 2004).

La energía térmica de la Tierra es inmensa, pero sólo una fracción puede ser usada por el hombre; debido a esto, la utilización de la energía está limitada a áreas en las cuales las condiciones geológicas permiten un transporte o transferencia de calor desde las zonas calientes profundas, las que están cerca de la superficie, o en la parte exterior.

En 1988 Stacey y Loper citaron un balance de calor, y calcularon el flujo de calor total proveniente de la Tierra; establecieron que es de 42×10^{12} W (conducción, convección y radiación) aproximadamente. De esta cantidad, 8×10^{12} W provienen de la corteza que representa sólo el 2% del volumen total de la Tierra, pero es rica en isótopos radiactivos; 32.3×10^{12} W pueden provenir del manto que representa el 82% del volumen total de la Tierra y 1.7×10^{12} W provienen del núcleo que es el 16% del volumen total y no contiene isótopos radiactivos. El calor radiogénico del manto es estimado en 22×10^{12} W.

Las estimaciones más recientes basadas en un gran número de datos, indican que el flujo total de calor de la Tierra es alrededor de 6% más alto que el calculado por Stacey y Loper en 1988.

El gradiente geotérmico expresa el incremento de la temperatura conforme aumenta la profundidad en la corteza terrestre. Sin embargo, sólo se puede tener acceso a cierta profundidad a través de perforaciones de pozos que con la tecnología moderna alcanzan el orden de los 10,000 m. El gradiente geotérmico promedio es alrededor de $2.0 - 2.5^\circ \text{C} / 100 \text{ m}$. Por ejemplo, la temperatura en los primeros metros no es tan alta, de hecho corresponde a la temperatura media anual del aire externo, (15°C). A 2,000 m tiene un valor de $55 - 65^\circ\text{C}$, de $75 - 90^\circ\text{C}$ a 3,000 m y así sucesivamente.

Existen sin embargo, inmensas áreas en las que el gradiente geotérmico se extiende varios cientos de metros (Dickson y Fanelli, 2004). En áreas en las que el basamento rocoso ha sufrido rápidos hundimientos, la cuenca resultante es rellenada con sedimentos recientes y el gradiente puede ser tan bajo como de $1^\circ\text{C}/100 \text{ m}$. Por otro lado, en varias áreas geotérmicas el valor aumenta en más de 10 veces el valor promedio. La diferencia de temperaturas entre zonas profundas calientes y las poco profundas, genera un flujo convectivo de calor que va de abajo hacia arriba, con una tendencia a crear condiciones uniformes.

Lo que determina el régimen térmico de una zona, y por tanto la distribución de temperaturas, es el balance entre el calor que entra en la base de la litósfera, desde el interior de la Tierra, el calor generado y absorbido en la misma, y el que finalmente se irradia hacia el exterior.

Hay que tomar en cuenta que el espesor de la litósfera tiene gran importancia en la distribución de temperaturas, puesto que la base de la misma es, una isoterma de temperatura elevada (1300 °C). Además, el adelgazamiento litosférico facilita la llegada de magma cerca de la superficie, principalmente en zonas de tectónica activa a través de fallas; en esas zonas van a ascender fluidos calientes que provienen de diferentes profundidades y pueden tener características distintas: pueden ser rocas fundidas generadas en la base de la corteza, o bien pueden estar constituidos principalmente por agua infiltrada desde la superficie de la Tierra y que ha penetrado hasta profundidades donde se ha calentado por contacto con rocas a alta temperatura, de tal forma que vuelve a ascender a la superficie transportando parte de la energía del interior.

El transporte de calor en el interior de la Tierra se lleva a cabo por medio de tres mecanismos (Prol, 1995): conducción, convección y radiación; sin embargo, los tres tienen diferente grado de importancia en las diferentes capas: en la corteza, el principal medio de transporte de calor es la conducción mientras que en el manto lo es la convección y la radiación.

La conducción es la forma como se transporta el calor de un cuerpo más caliente a uno más frío con el cual se encuentra en contacto. La eficiencia de ésta depende de una propiedad de los materiales que se llama conductividad térmica y que nos dice cuál será la diferencia de temperatura provocada por un flujo de calor: a mayor conductividad menor será la diferencia de temperatura a través del material.

La convección es un proceso un poco más complejo que se da solamente en fluidos (líquidos y gases). Al ser calentada la parte inferior de un fluido, ésta se expandirá y se volverá menos densa que la parte superior más fría, por lo cual tenderá a subir, con lo que la parte fría quedará ahora en contacto con la fuente de calor repitiéndose de esta forma el proceso y dando origen a lo que se llama celdas de convección, en las cuales existen corrientes ascendentes y descendentes. Este mecanismo se va a generar a partir de un cierto valor de la diferencia de temperatura y depende de la viscosidad y densidad del fluido.

La radiación es una forma de transporte de calor que es importante a temperaturas altas; en realidad todos los cuerpos que tienen temperatura por arriba del cero absoluto emiten radiación, pero la frecuencia de la radiación emitida es proporcional a la temperatura del material.

De esta forma se observa que el transporte de calor en el interior de la Tierra va a depender de la temperatura y de las características del material. La corteza se comporta como un sólido y tiene temperaturas relativamente bajas. El manto se comporta como un fluido y como la convección es mucho más eficiente en este caso, éste es el principal medio de transporte, aun cuando las temperaturas relativamente altas hacen posible que la energía también se transporte por medio de la radiación.

La media terrestre del flujo de calor en los continentes y océanos es de aproximadamente 65 y 101 mW/m² respectivamente, mientras que en otras regiones se produce un flujo medio de 87 mW/m². Estos valores están basados en 24, 774 mediciones en 20, 201 sitios cubriendo el 62% de la superficie de la Tierra (Pollack et al., 1993).

La temperatura se incrementa con la profundidad, además los volcanes activos representan importantes fuentes de calor; estas manifestaciones pueden ser manantiales termales, géiser, etc.; son expresiones visibles y tangibles del calor que emerge de la Tierra, pero este calor también engendra otros fenómenos naturales que son poco entendibles sobre todo por sus grandes magnitudes, por lo que la Tierra ha sido comparada con una inmensa máquina térmica, que se entiende mejor si nos apoyamos en la Teoría de la Tectónica de Placas.

El planeta Tierra se compone de una corteza con un espesor aproximado de 20-70 Km en áreas continentales y de 5-6 Km en áreas oceánicas; un manto con un espesor aproximado de 2, 900 Km y un núcleo de alrededor de 3470 Km de radio. Las características físicas y químicas de la corteza, manto y núcleo, varían desde la superficie de la Tierra hacia su centro (Figura I.1).

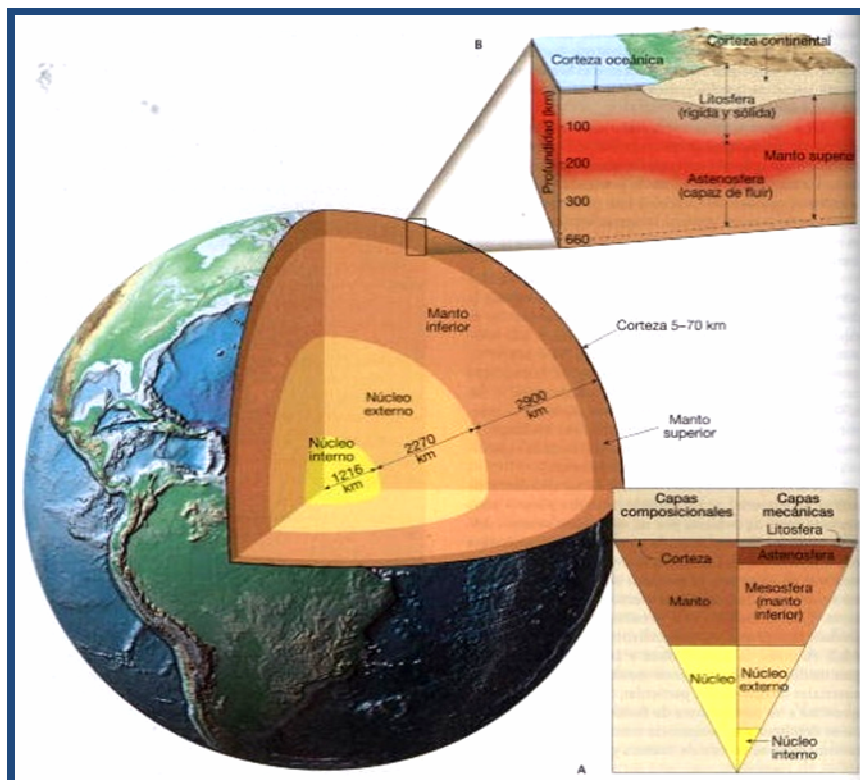


Figura I.1 Esquema de la estructura en capas de la Tierra. A. El núcleo interno, el núcleo externo y el manto están dibujados a escala, pero el grosor de la corteza se ha exagerado en unas cinco veces. B. ampliación de la corteza de la Tierra. Muestra los dos tipos de corteza (oceánica, continental), la litósfera y la astenósfera (Tomada de Tarbuck y Lutgens, 2000).

Desde el punto de vista tectónico, la parte externa de la Tierra corresponde con la litósfera, compuesta por la corteza y el manto superior, formando un nivel relativamente rígido y frío (Tarbuck y Lutgens, 2000). Este nivel consta de materiales cuyas composiciones químicas son notablemente diferentes, pero que actúan como una unidad y se comportan de manera frágil frente a la deformación. Con un grosor medio de unos 100 Km, la litósfera puede alcanzar los 250 Km o más debajo de las porciones más antiguas (escudos) de los continentes. Dentro de las cuencas oceánicas, la litósfera tiene un grosor de tan sólo unos pocos Km debajo de las dorsales oceánicas y aumenta hasta 100 Km en regiones donde hay corteza más antigua y fría.

Debajo de la litósfera (a una profundidad de 660 Km aprox.) se encuentra una capa blanda, relativamente plástica, localizada en el manto superior, y que se conoce como astenósfera (“esfera débil”). La región que abarca los primeros 150 Km, más o menos de la astenósfera, tiene unas condiciones de temperatura y presión que permiten la existencia de una pequeña porción de roca fundida (quizá de un 1 a un 5%). Dentro de esta zona muy dúctil, la litósfera está efectivamente separada de la astenósfera situada debajo. La consecuencia es que la litósfera es capaz de moverse con independencia de la astenósfera.

Es importante destacar que la resistencia a la deformación de los diversos materiales de la Tierra es función a la vez, de su composición, de la temperatura y de la presión a que estén sometidos. No toda la litósfera es quebradiza o frágil, como las rocas encontradas en la superficie, ya que, las rocas de la litósfera se vuelven progresivamente más dúctiles con la profundidad, por el incremento de la presión y la temperatura.

A la profundidad a la que se encuentra la astenósfera superior, las rocas están lo suficientemente cerca de su temperatura de fusión que son fáciles de deformar, por lo tanto, la astenósfera es dúctil porque está caliente, sin embargo en el material situado debajo de esta zona dúctil, la mayor presión compensa los efectos de la mayor temperatura. Por consiguiente, estos materiales se van endureciendo de manera gradual con la profundidad, de forma que el manto inferior es más rígido que el superior. Por ello, los materiales del manto inferior siguen siendo capaces de fluir muy lentamente.

La Tierra es un planeta dinámico, esto se ha aprendido y documentado apenas en las últimas siete décadas. La evolución del conocimiento sobre la dinámica de la Tierra empezó a principios del Siglo XX con la propuesta radical de la deriva continental, con la idea de que los continentes se movían sobre la superficie del planeta. Esta propuesta fue recibida con escepticismo debido a que contradecía lo establecido. Tuvieron que pasar más de 50 años antes de que se obtuvieran datos suficientes para transformar esa hipótesis en una

teoría sólida que enlazara todos los procesos básicos, que se sabía de manera empírica, actuaban en la Tierra.

Según el modelo de la Tectónica de Placas (Tomado de Tarbuck y Lutgens, 2000), la litósfera está dividida en numerosos fragmentos denominados placas, que están en movimiento y cuya forma y tamaño cambian continuamente. Las placas litosféricas se mueven a velocidades lentas pero continuas, de unos pocos centímetros al año. Este movimiento está impulsado en última instancia por la desigual distribución del calor dentro de la Tierra, ya que el material caliente que se encuentra en profundidad en el manto se mueve despacio hacia arriba y actúa como una parte del sistema de convección interno del planeta. A la vez, los fragmentos más fríos y densos de la litósfera descienden de vuelta hacia el manto, poniendo en movimiento la capa externa y rígida de la Tierra. En último extremo, los dificultosos y titánicos movimientos de las placas litosféricas de la tierra generan los terremotos, crean los volcanes y deforman grandes masas de roca transformándolas en montañas; todo lo anterior tiene que ver con el calor interno de la Tierra.

Cada placa se mueve como una unidad coherente con respecto a las otras placas, aunque el interior de las mismas pueda deformarse; todas las interacciones entre ellas se producen a lo largo de sus límites. De hecho, los primeros intentos por esbozar los límites de las placas se realizaron localizando los epicentros de terremotos. Las placas están unidas por tres tipos distintos de límites, que se diferencian por el tipo de movimiento que exhiben, esos límites son (Tarbuck y Lutgens, 2000):

- Límites divergentes, donde las placas se separan, lo que produce el ascenso del material del manto para crear un nuevo piso oceánico.
- Límites convergentes, donde las placas se aproximan, lo que tiene como consecuencia la subducción (consumo) de la litósfera oceánica en el manto.
- Límites de falla transformante, donde las placas se deslizan una con respecto a la otra sin producción ni destrucción de litósfera.

Además, con el tiempo los límites pueden modificarse en respuesta a cambios en las fuerzas que actúan sobre las placas.

Siempre que la temperatura en el interior de nuestro planeta se mantenga significativamente más elevada que la temperatura próxima a la superficie, el material del interior de la Tierra se seguirá moviendo. Este flujo interno, a su vez, mantendrá en movimiento a la litósfera. Por tanto, mientras el motor térmico interno de la Tierra esté funcionando, las posiciones y las formas de los continentes y las cuencas oceánicas cambiarán, y la Tierra seguirá siendo un planeta dinámico con múltiples manifestaciones geotérmicas a diferentes escalas.

I.4 IMPORTANCIA DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Después de la Segunda Guerra Mundial al crecer la demanda de energía, muchos países fueron atraídos por la energía geotérmica, considerándola económicamente competitiva respecto de otras fuentes energéticas. Esta en muchos casos no requiere ser importada y, en otros casos, es la única fuente de energía localmente disponible.

La forma de explotación de un yacimiento geotérmico depende esencialmente del volumen y la temperatura del agua; cuando existe vapor, la energía geotérmica se puede convertir en electricidad y en el caso de yacimientos de agua caliente, por lo general la energía geotérmica es usada en la calefacción de viviendas, baños públicos, áreas recreativas (balnearios), viveros, etc. El uso de las fuentes termales en la medicina es una forma de utilización de la energía geotérmica que no puede ser cuantificada directamente como variable física y sin embargo, representa una contribución no despreciable a la economía de un país a través de la terapia.

Si se clasifica la energía geotérmica en función de la temperatura del subsuelo, se puede obtener la Tabla I.1, en la que además se refieren algunos de los usos que se dan a este tipo de yacimientos según el Instituto Geológico de España (IGME).

Además, atendiendo a su localización con respecto a la superficie, la explotación de energía geotérmica se puede separar en geotermia cerca de la superficie y geotermia de alta profundidad. Mientras la geotermia cerca de la superficie está explotada con colectores y sondas instalados en la Tierra a profundidades aproximadamente de 100-150 m, se utiliza para suministrar energía a edificios individuales (o complejos de edificios); la explotación de alta profundidad ofrece la posibilidad de proyectos de suministro de energía más largos, incluyendo la generación de energía eléctrica.

La energía hidrotérmica es un caso especial porque ésta usa capas con agua (acuíferos) en alta profundidad. Esta opción necesita por lo mínimo dos perforaciones (perforación de producción y perforación de re-inyección), porque el agua termal producida debe ser re-inyectada en la misma capa después de enfriarlo.

En el tema IV se verán a detalle los usos y aplicaciones de la energía geotérmica.

Tipo Yacimiento	Posible albergue del calor	Rango de Temperatura	Uso Principal
MUY BAJA ENTALPÍA	Subsuelo (con o sin agua)	$5\text{ °C} < T < 25\text{ °C}$	Climatización
	Aguas subterráneas	$10\text{ °C} < T < 22\text{ °C}$	
BAJA ENTALPÍA	Aguas termales	$22\text{ °C} < T < 50\text{ °C}$	Balnearios, Acuicultura
	Zonas volcánicas	$T < 100\text{ °C}$	Procesado de Alimentos
	Depósitos sedimentarios profundos		
MEDIA ENTALPÍA		$100\text{ °C} < T < 150\text{ °C}$	Electricidad ciclos binarios
ALTA ENTALPÍA		$T > 150\text{ °C}$	Electricidad

Tabla 1.1 Clasificación de los recursos geotérmicos de acuerdo a su temperatura y algunos de sus usos más comunes (IGME, 2009).

I.5 DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS

A nivel mundial, los principales recursos geotérmicos se localizan preferentemente en los límites entre las diversas placas tectónicas, en las que está fragmentada la litósfera. Particularmente en los límites de tipo convergente, es muy frecuente la formación de magma que eventualmente puede actuar como fuentes de calor para dar lugar a sistemas geotérmicos. En la Figura 1.2 se muestra la distribución mundial de campos geotérmicos y su relación con el patrón del tipo de tectónica de la zona.

Como los sistemas geotérmicos se forman preferentemente en los bordes entre placas tectónicas, donde también suelen ocurrir fenómenos de vulcanismo y sismicidad, los países ubicados en o cerca de esos sitios son los que poseen más recursos geotérmicos, como ocurre con México donde interactúan la Placa del Pacífico, de Norteamérica, de Cocos, de Rivera y del Caribe.

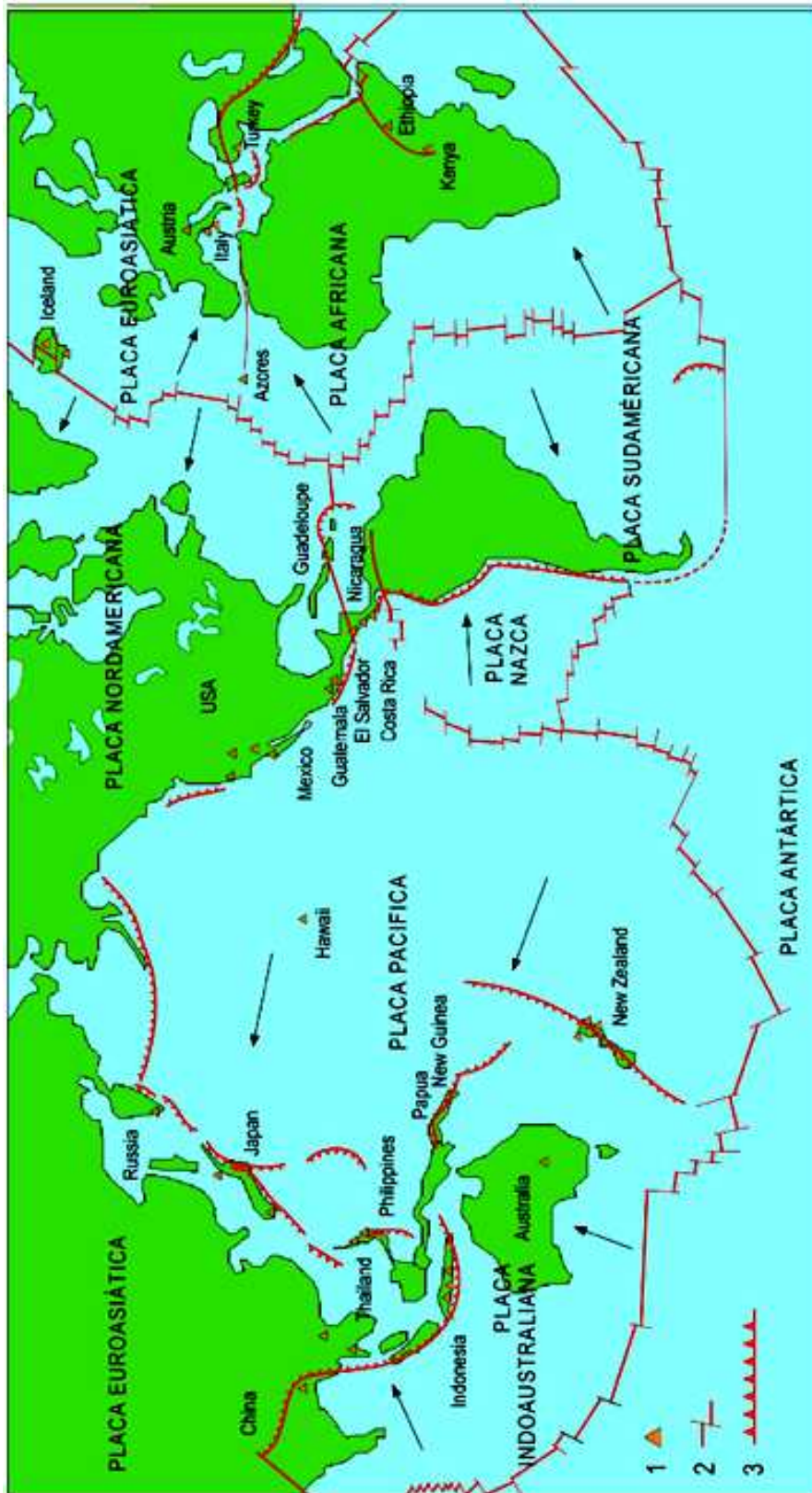


Figura 1.2 Distribución mundial de placas, dorsales oceánicas, trincheras oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos. Las flechas muestran la dirección del movimiento de las placas hacia las zonas de subducción. 1. Campos geotérmicos productores de electricidad. 2. Dorsales meso-oceánicas cruzadas por fallas transformantes 3. Zonas de Subducción (Tomada de Dickson y Fanelli, 2004).

Los países que disponen de este tipo de energía, la utilizan de manera directa para diversas aplicaciones (calefacción, balnearios, deshidratación de vegetales, invernaderos, secado de madera, bombas de calor, etc.), pero sólo 27 países, hasta la fecha, la emplean de manera directa o indirecta para generar energía eléctrica.

Esos países tienen una capacidad geotermoeléctrica instalada total de más de 10 mil megawatts, estando ahora México en cuarto lugar, como se observa en la Tabla 1.2, que enlista algunos de ellos e incluye datos actualizados a agosto de 2009.

PAÍS	CAPACIDAD (MW)
Estados Unidos	3,040
Filipinas	1,980
Indonesia	1,058
México	958
Italia	791
Nueva Zelanda	550
Japón	535
Islandia	220
El Salvador	204
Costa Rica	163
Kenya	162
Rusia	110
Nicaragua	87
Turquía	84
Guatemala	48
China	24
Portugal (Islas Azores)	23
Francia*	16
Otros	28
Total	10,081

*Incluye Alsacia e Isla Guadalupe

Tabla 1.2 Países que tienen capacidad geotermo-eléctrica instalada (Tomada de geotermia.org.mx, 2009).

Las técnicas de exploración geotérmica en el mundo, han estado sujetas a cambios que van de acuerdo con los avances tecnológicos en sísmica, geoquímica, geología, instrumentos electrónicos desarrollados, etc. Inicialmente la exploración sólo se realizaba en aquellos lugares de manifestaciones hidrotermales superficiales, con lo cual, se seleccionaban

sitios para realizar las perforaciones de exploración. Hoy en día, además de eso se efectúan estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos a detalle, los que permiten identificar yacimientos geotérmicos aún en zonas que no tienen aparentemente ninguna alteración hidrotermal, o ninguna manifestación superficial.

Los estudios regionales tienen como objetivo la evaluación preliminar de las posibilidades geotérmicas a nivel nacional, mediante el análisis de la información existente tales como mapas geológicos, topográficos, imágenes satelitales, entre otros.

Un recorrido por diferentes zonas, en donde se realizan observaciones de carácter superficial, representa el estudio inicial de exploración de campos geotérmicos, de los cuales se recaban datos a detalle tanto regional como localmente. En función del resultado, se procede a efectuar levantamientos topográficos, mapeos y muestreos a fin de determinar que tan factible es de ser explotada la región en cuestión.

Por otro lado, las investigaciones de reconocimiento y laboratorio conducen a seleccionar las áreas de mayor interés, a las cuales posteriormente se les define su prioridad en un programa exploratorio detallado, cuyo objetivo se dirige a la determinación de un modelo geotérmico preliminar, que tiende a localizar sitios para perforación de pozos exploratorios profundos con diámetros correctos para pruebas de producción.

Los métodos geológicos, geofísicos y geoquímicos, sirven para localizar las fuentes de calor y los caminos de ascenso de los fluidos hidrotermales, los cuales, en presencia de actividad volcánica, ven modificada su composición química debido a la interacción de los fluidos ácidos con el medio ambiente. El empleo de termómetros de SiO₂ puede dar información cuantitativa sobre la fuente de calor. Cuando existen inclusiones orgánicas en las rocas sedimentarias, se puede obtener información sobre la historia geológica y el tipo de reservorio geotérmico.

La energía geotérmica es un recurso muy valioso que aporta un porcentaje reducido de energía al consumo mundial, pero que dada la escasez de energéticos fósiles y la alta demanda de energía, cada vez recobra mayor importancia, por lo que las técnicas de exploración y producción se han mejorado sustancialmente en los últimos años.

CAPÍTULO II CAUSAS DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA EN EL SUBSUELO

II.1 GRADIENTE GEOTÉRMICO NATURAL

Basados en dataciones radiométricas, la edad de la Tierra es estimada en 4.5 millones de años aproximadamente (Buntebarth, 1994), y se interpreta que desde su origen, la Tierra ha evolucionado y alcanzado su estado térmico actual, el cual se trata de explicar mediante el uso de métodos directos e indirectos. Una de las variables que describen el estado físico de la Tierra es la temperatura, la cual varía de un lugar a otro y, además, es independiente del tiempo. Como ejemplos se tienen las variaciones de su temperatura superficial en el transcurso de un año o la misma evolución térmica de nuestro planeta desde su formación.

La temperatura en la corteza de la Tierra aumenta en promedio a una razón de 30°C por kilómetro (Prol, 1995), esto indica que en alguna parte en el interior de la Tierra existe una fuente de calor que lo irradia hacia la superficie. Ahora la pregunta es: ¿de dónde viene este calor?

La Tierra es uno de los planetas pertenecientes al Sistema Solar que, junto con aproximadamente una docena de lunas y numerosos cuerpos más pequeños, gira alrededor del Sol. La naturaleza ordenada de nuestro sistema solar lleva a la mayoría de los astrónomos a deducir que todos sus componentes se formaron esencialmente al mismo tiempo, y de la misma materia primordial que el Sol. Este material formó, al inicio del Sistema Solar, una gran nube de polvo y gases de la denominada nebulosa primordial.

La hipótesis de la nebulosa primordial es una de las hipótesis más aceptada (ya que difícilmente puede ser comprobada) y afirma que el Sistema Solar evolucionó a partir de una acumulación de polvo cósmico (nebulosa), que al compactarse en presencia del campo gravitacional del Sol formó los diferentes cuerpos que componen el Sistema Solar. Según esta hipótesis, las características de los planetas quedaron determinadas por su masa inicial y su distancia al Sol. Al irse compactando, la masa de estos "protoplanetas" aumentaba cuando otras partículas chocaban contra ellos y se les anexaban, lo cual hacía que aumentara también su temperatura. Ésta fue una de las fuentes geotérmicas iniciales del calor de la Tierra, pero al ir evolucionando ésta, otras fuentes hicieron su aparición (Prol, 1995).

Una vez que el planeta como tal estuvo inicialmente formado, esto es, cuando atrapó las partículas que se encontraban en la misma órbita, sucedió un fenómeno conocido como diferenciación gravitacional y que fue simplemente el hundimiento de los elementos más pesados y el transporte a la

superficie de los más ligeros; se interpreta que al formarse el planeta, todos los elementos se hallaban distribuidos al azar, y después se fueron agregando o separando. Esta redistribución de los elementos se llevó a cabo con una gran liberación de energía por fricción, lo que provocó un aumento en la temperatura y la fusión de la mayor parte del material que formaba la Tierra. A partir de este proceso, la estructura de la Tierra sufrió una estratificación, formando una serie de capas concéntricas, las cuales han sido determinadas por medio de datos sismológicos que también han sido útiles para determinar sus características fisicoquímicas (Prol, 1995).

Desde el punto de vista químico, las principales capas composicionales que conforman la Tierra son tres: corteza, manto y núcleo; sus espesores son variables de aproximadamente 5-70, 2900 y 3500 Km respectivamente (Tarbuck y Lutgens, 2000). A su vez, las dos últimas se subdividen en manto superior e inferior y núcleo externo e interno (Figura II.1).



Figura II.1 Estructura interna de la Tierra con las capas determinadas por medio de datos sismológicos (Modificada de Prol Ledesma, 1995).

Por otro lado, la división del interior de la Tierra desde el punto de vista mecánico, es la siguiente (Tarbuck y Lutgens, 2000): la litósfera, que comprende la corteza y el manto superior, que forman un nivel relativamente rígido y frío que consta de materiales cuyas composiciones químicas son notablemente diferentes, pero que actúan como una unidad y se comportan de manera frágil frente a la deformación; la astenosfera, que está debajo de la litosfera y que es una capa dúctil, relativamente plástica, localizada en el manto superior; la mesosfera, que es el manto inferior, el núcleo externo, y el núcleo

interno. La Figura II.2 muestra de manera esquemática una comparación entre los dos tipos de división interna de la Tierra.

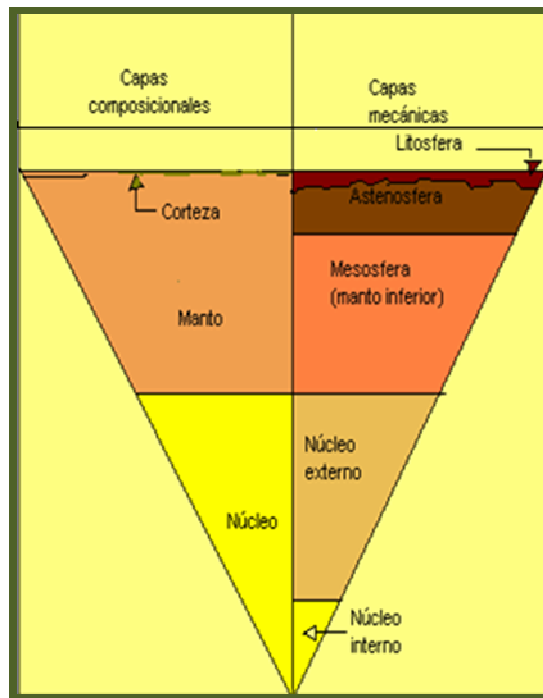


Figura II.2 Comparación entre capas considerando la composición química y el comportamiento mecánico de la Tierra (Modificada de Tarbuck y Lutgens, 2000).

Debido al mecanismo por el que se formó y distribuyeron los materiales en la Tierra, las capas externas son más ricas en minerales compuestos por sílice y aluminio, y a medida que aumenta la profundidad aumenta también el contenido de hierro y magnesio, que son elementos más pesados, hasta llegar al núcleo que se supone está formado principalmente por hierro y níquel. Como ejemplo de rocas formadas por minerales con alto contenido de sílice y aluminio se tienen a las arcillas y el granito, siendo este último el tipo de roca predominante en la corteza de tipo continental. Entre las rocas formadas en proporciones significativas por minerales ferromagnesianos están el basalto, el gabro y la peridotita; el basalto es la roca que forma la corteza de tipo oceánico y el olivino es un mineral que se encuentra formando parte de las rocas de la base de la corteza y del manto superior.

De acuerdo con Prol (1995), poco a poco la corteza terrestre se fue enfriando hasta solidificarse; sin embargo, las capas interiores no se enfriaron tan rápidamente, en gran parte debido a que la corteza es muy mala conductora del calor y actúa como un aislante térmico para las capas interiores, que de esta forma pueden mantener temperaturas altas (Figura II.3).

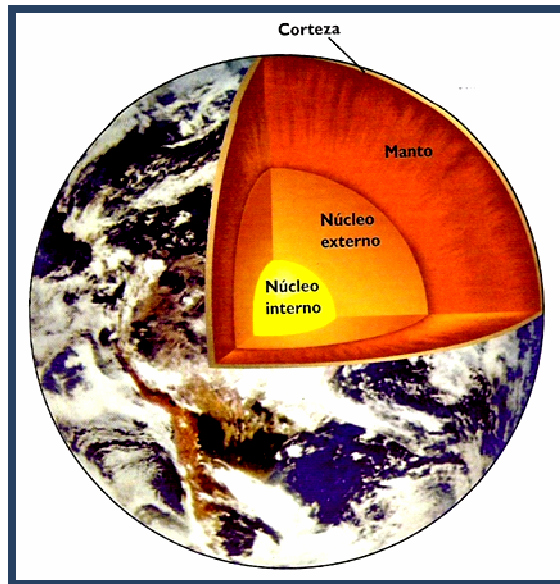


Figura II.3 Esquema de la parte interna de la Tierra, donde se muestra como la corteza sirve de capa aislante para mantener las altas temperaturas en el interior (Tomada de blogger.com, 2007).

Además de evitar que el calor del interior de la Tierra escape, la corteza es en parte generadora de calor adicional debido a la presencia de una gran cantidad de elementos radiactivos que contiene. Podría parecer paradójico que los elementos radiactivos hayan permanecido en las capas más superficiales de la Tierra a pesar de ser elementos pesados, sin embargo es posible encontrar una explicación a esto al observar que los elementos radiactivos generalmente se combinan con otros elementos para formar compuestos ligeros, siendo ésta la forma que explica como fueron transportados a las capas superiores. En la actualidad se les encuentra principalmente en la corteza terrestre y en menor concentración en el manto superior.

Aunque la Tierra se ha ido enfriando desde su formación, aún sigue desprendiendo calor desde su interior, sin embargo, existen otras causas por las que se incrementa la temperatura en el subsuelo las cuales son:

- De origen radiométrico
- De origen mecánico
- De origen magmático
- De origen químico

A continuación se describen las principales características de cada una de ellas.

II.2 CAUSAS DE ORIGEN RADIOMÉTRICO

En su libro *radiactividad*, Silvia Bulbulian (1995), comenta que el descubrimiento de la radiactividad y de los elementos radiactivos naturales en los últimos años del Siglo XIX, marcó el inicio de una serie de descubrimientos importantes que cambiaron completamente la idea que se tenía sobre la estructura de la materia. Se tuvo que abandonar la noción que se tenía del átomo como un objeto simple, compacto e invisible a favor del concepto de una estructura más compleja.

La radiactividad fue descubierta en 1896 por el químico francés Becquerel durante sus estudios sobre la fluorescencia, al observar que una placa fotográfica no expuesta a la luz y envuelta en papel negro era impresionada tanto por la luz visible como ultravioleta, o por los rayos X recientemente descubiertos por Röntgen; cuando el paquete se ponía en contacto con compuestos del elemento pesado uranio. Dedujo que este elemento debía producir algún tipo de radiación la cual atravesaba el papel hasta alcanzar y afectar a la emulsión fotográfica. Un cuidadoso estudio emprendido por Becquerel y otros científicos de la época, entre ellos los Curie, Joliot, Soddy, Rutherford, Chadwick y Geiger, reveló que cierto número de elementos químicos pesados parecían ser interiormente inestables y daban a origen a radiaciones penetrantes. Con ello, esos mismos elementos se transformaban en otros diferentes, siguiendo caminos complicados, pero bien definidos, en busca de una estabilidad final. Este fenómeno totalmente distinto de cualquier otro estudiado hasta entonces, recibió el nombre de *radiactividad*, y el proceso de transformación fue llamado desintegración radiactiva (Bulbulian, 1995).

Al descubrirse la radiactividad, los científicos observaron que las muestras de elementos radiactivos aislados tenían mayor temperatura que el recinto en que se trabajaba; con el tiempo se dieron cuenta que esto era debido a la energía liberada en el proceso radiactivo.

La radiactividad es una propiedad de ciertos elementos químicos cuyos núcleos atómicos son inestables: con el tiempo, para cada núcleo llega un momento en que alcanza su estabilidad al producirse un cambio interno, llamado *desintegración radiactiva*, que implica un desprendimiento de energía conocido de forma general como "radiación". La radiación es el mecanismo por el cual el calor se transmite por radiación electromagnética; la energía se transmite sin contacto entre los cuerpos, en ausencia de un medio. La energía que interviene es muy grande si se compara con la desprendida en las reacciones químicas en que pueden intervenir las mismas cantidades de materiales, y el mecanismo por el cual se libera esta energía es totalmente diferente (Bulbulian, 1995).

Durante la desintegración radiactiva, los núcleos inestables se descomponen espontáneamente, ya sea emitiendo energía electromagnética o partículas

subatómicas. La desintegración radiactiva puede tener lugar de varias maneras diferentes.

II.2.1 Desintegración Alfa

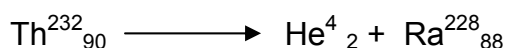
Un núcleo demasiado pesado para ser estable expulsa un grupo compacto (una partícula alfa), consistente en dos protones, y dos neutrones, que deja al núcleo con una masa atómica cuatro unidades menor y un número atómico dos unidades más bajas, es decir, dos pasos atrás en la tabla periódica. La desintegración alfa es frecuente entre los elementos naturales más pesados (uranio, polonio, y radio, por ejemplo), pero no conduce directamente a núcleos estables: antes se producen isótopos intermedios que experimentan nuevas desintegraciones. Las partículas alfa tienen una energía de hasta 5,000,000 de electrovoltios (Skoog, et.al., 2008).

Por ejemplo, los átomos de radio con 226 nucleones se descomponen espontáneamente y emiten partículas alfa. Como las partículas alfa son idénticas a los núcleos de helio, el proceso se puede resumir por medio de la ecuación (Sagan, 2008):



El nuevo elemento, que tiene dos protones menos, se identifica por su número atómico (86) como radón Rn.

Otro ejemplo es el de el torio-232 que se desintegra radiactivamente en un proceso de tres etapas, en la primera etapa emite radiación alfa, por lo que el torio disminuye su número de masa en 4 unidades y su número atómico en 2 unidades, por lo que se transforma en radio 228. La ecuación química nuclear que representa este proceso es (Sagan, 2008):

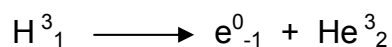


II.2.2 Desintegración Beta

Es un núcleo con demasiados neutrones, uno de estos puede transformarse en un protón más un electrón, que es expulsado en el núcleo. El electrón emitido de esta forma recibe el nombre de partícula β . El núcleo queda con una carga positiva más, con su número atómico en una unidad más alta y, por lo tanto, un lugar más arriba en la tabla periódica. La desintegración β es el tipo más frecuente de desintegración radiactiva tanto entre los isótopos radiactivos procedentes de la desintegración alfa (Sagan, 2008).

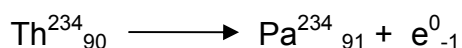
Como ejemplo, el tritio es uno de los isótopos pesados del hidrógeno. Como todo núcleo de hidrógeno, el núcleo del tritio, contiene un protón. Sin embargo, a diferencia del isótopo más común de hidrógeno el núcleo del tritio contiene dos neutrones, y por lo tanto, su masa es de 3 uma (unidades de masa

atómica) H^3_1 , el tritio se descompone por desintegración beta. Puesto que una partícula beta es idéntica a un electrón, podemos describir el proceso con la siguiente ecuación (Sagan, 2008):



El isótopo que se produce se identifica por su número atómico como Helio.

Otro ejemplo de emisión de radiación beta es la desintegración radiactiva del torio-234 (90 protones y 144 neutrones) a protactinio-234 (91 protones y 143 neutrones) más radiación beta, que se representa mediante la ecuación química nuclear (Sagan, 2008):



II.2.3 Emisión de rayos gamma

Esta emisión tiene lugar siempre que la desintegración beta no ha disipado suficiente energía para dar completa estabilidad al núcleo. Muchos isótopos naturales y artificiales con actividad alfa y beta son también emisores de rayos gamma.

La radiación gamma consiste en una emisión de fotones de alta energía y de longitud de onda muy corta ($\lambda = 0.0005$ a 0.1 nm); la emisión de radiación gamma acompaña a casi todas las reacciones nucleares, se produce debido a un cambio de energía en el núcleo. Un núcleo excitado, procedente de la emisión de partículas alfa o beta, emite a su vez un fotón, descendiendo a un estado energético más bajo y más estable. La radiación gamma no produce ningún cambio en el número atómico ni en el número de masa. Esta es la razón por la que suele no escribirse en las ecuaciones de las reacciones nucleares (Sagan, 2008).

Como ejemplo de lo anterior, se tiene que cuando un núcleo emite una partícula alfa como ya se mencionó, su número atómico disminuye en 2 unidades y su masa atómica disminuye en 4 unidades. Por ejemplo, si un átomo de uranio de número atómico 92 y número de masa 238, emite una partícula alfa se produce un isótopo de torio de número atómico 90 y número de masa 234. El proceso nuclear se representa mediante la ecuación química nuclear (Sagan, 2008):



II.2.4 Principales elementos productores de energía radiactiva

Los elementos radiactivos naturales se encuentran distribuidos en forma bastante uniforme en las rocas y suelos de la corteza terrestre, la cual está constituida principalmente por basalto y granito.

La mayor parte de la radiactividad que proviene principalmente de las series radiactivas naturales, tiende a escapar de la corteza terrestre y puede ser arrastrada por el agua o algún otro fluido para migrar hacia la superficie terrestre y pasar finalmente a la atmósfera. El uranio es mucho más abundante en la naturaleza que otros elementos comunes; se encuentra en una proporción 40 veces mayor que la plata y 800 veces mayor que el oro. En la corteza, los granitos contienen una concentración de torio de tres a cinco veces mayor. Existen regiones en las que, por distintas causas geológicas y geoquímicas las concentraciones de los elementos radiactivos son anormalmente altas; es en los yacimientos minerales radiactivos donde existen mayores cantidades de uranio y torio (Bulbulian, 1995).

Los principales elementos productores de energía por decaimiento radioactivo son el uranio, el torio y el potasio. Se estima que cerca del 50% del flujo total de calor procede de la desintegración de isótopos radiactivos de vida larga presentes en la corteza y el manto. Estos son principalmente los isótopos U^{235} , U^{238} , Th^{232} y el K^{40} . En la Tabla II.1 se muestran las contribuciones de energía de cada isotopo y su contenido en los tipos de roca que constituyen la corteza y el manto terrestre. Aunque la concentración de estos isótopos es muy superior en la corteza (principalmente en la continental), el manto aporta gran parte de la energía debido a su mayor volumen (Smith, et al., 2006).

	Granito	Basalto Toleítico	Basalto Alcalino	Peridotita	Corteza continental	Corteza oceánica	Manto
Composición							
U(ppm)	4	0.1	0.8	0.006	1.6	0.9	0.02
Th (ppm)	15	0.4	2.5	0.4	5.8	2.7	0.10
K (%)	3.5	0.2	1.2	0.1	2	0.4	0.02
Producción de calor por Kg de roca ($10^{-10}W Kg^{-1}$)							
U	3.9	0.1	0.8	0.006	1.6	0.9	0.02
Th	4.1	0.1	0.7	0.010	1.6	0.7	0.03
K	1.3	0.1	0.4	0.004	0.7	0.1	0.007
Total	9.3	0.3	1.9	0.020	3.9	1.7	0.057
Densidad $10^3 Kg m^{-3}$							
	2.7	2.8	2.7	3.2	2.7	2.9	3.2
Producción de calor por m^3 de roca ($\mu W m^{-3}$)							
	2.5	0.08	0.5	0.006	1.0	0.5	0.02

Tabla II.1 Concentración de elementos radiactivos y producción de calor según los distintos tipos de rocas (Tomada de Smith, et al., 2002).

Las fuentes de radioactividad natural, por medio de las cadenas de desintegración, son normalmente uranio, torio y potasio. Para conocer cuál es la contribución radiogénica al flujo de calor del planeta Tierra, se necesita conocer las cantidades de los elementos radiogénicos en las diferentes capas de la Tierra, ya que ese flujo de calor depende de tres grupos básicos de datos: las masas totales de uranio, torio y potasio, que están relacionadas con el flujo de calor radiogénico, sin embargo, los datos sobre las cantidades de estos elementos en el interior de la Tierra son bastante limitados dado que sólo la corteza y la parte superior del manto son accesibles a los análisis geoquímicos.

Como el uranio, el torio y el potasio son elementos litófilos, se acumulan en la corteza continental. Se han podido realizar estimaciones sobre la masa de uranio en la corteza terrestre, que están entre $(0.2-0.4) \times 10^{17}$ Kg, mientras las concentraciones en el manto son mucho menores, las cantidades totales son comparables debido a que el volumen del manto es mucho mayor. Las estimaciones para el manto están entre $(0.4-0.8) \times 10^{17}$ kg (Smith, et al., 2002).

Hay que hacer notar, sin embargo, que estas estimaciones son mucho menos fiables que las de la corteza, al haberse obtenido mediante el análisis de muestras que han emergido del manto superior (a una profundidad de unos pocos cientos de kilómetros) y se han extrapolado los resultados al completamente inexplorado manto inferior (aproximadamente 3,000 km). Partiendo de argumentos geoquímicos, el uranio sería despreciable en el núcleo, que es completamente inaccesible a la observación (Smith, et al., 2002).

En cuanto a las cantidades, se estima que $\text{Th}/\text{U} \approx 4$, lo que es consistente con los valores en los meteoritos, mientras que para el potasio se encuentra en la Tierra en una cantidad aproximada $\text{K}/\text{U} = 10.000$, un valor sorprendente ya que es un factor siete veces más bajo que en los más antiguos meteoritos. La abundancia de potasio en el interior de la Tierra y la posibilidad de que parte esté enterrado en el núcleo, y su contribución al calor terrestre son aspectos aún debatidos por los geoquímicos (Smith, et al., 2002).

II.3 CAUSAS DE ORIGEN MECÁNICO

El estado térmico del interior de la tierra debería ser descrito como una función del tiempo y del espacio según Günter Buntebarth (1994), en los párrafos siguientes se describe a detalle el porqué de ello.

Las variaciones de temperatura en la superficie pueden introducir cambios en el campo de temperaturas que reinan a profundidad; como ejemplo de estos cambios, se tienen aquellos inducidos por las variaciones periódicas diarias y anuales o aún por las variaciones climatológicas con períodos mayores. El campo de temperaturas también se ve afectado por la morfología de la superficie y por la gran cantidad de cambios geológicos del dominio próximo

de la corteza. Los fenómenos tectónicos tienen también una influencia considerable, ya que de esta forma se pueden transportar mediante convección una gran cantidad de calor más rápidamente que mediante la difusión de calor por pura conducción térmica. Con la interrelación de todas estas variables mencionadas y con el aporte de flujo de calor de la parte superior del manto o bien de la corteza inferior, se establece un estado térmico en la corteza terrestre que da origen a un campo de temperaturas que es conmensurable y que varía con la posición y el tiempo (Buntebarth, 1994).

La temperatura del subsuelo, sufre variaciones que se encuentran relacionadas con el movimiento de la tierra. Hay variaciones de temperatura de período corto del orden de un día, de período más largo del orden de un año. Existen otras con períodos aún más largos. Las diversas variaciones de temperaturas penetran en la tierra a profundidades totalmente diferentes, esto finalmente está en función de los factores meteorológicos, la latitud geográfica y con ello es fácil ver que hay mayores efectos perturbadores en las variaciones diurnas que en las anuales.

La topografía es otro elemento que ejerce su influencia sobre el campo de temperaturas del subsuelo. En una superficie plana las isotermas, en el caso de un subsuelo homogéneo, son paralelas a la superficie. No existe ningún gradiente horizontal de temperatura, sin embargo, las montañas y los valles debido a su morfología dan origen a una variación en el campo de temperaturas. En este caso las isotermas no son paralelas a la superficie terrestre, sino que se apartan de tal paralelismo de acuerdo a la topografía, por lo que existe un gradiente horizontal de temperatura (Buntebarth, 1994).

Las diferencias son tales que bajo una montaña los gradientes de temperatura son menores que debajo de una superficie plana, y por debajo de un valle son mayores a los que serían por debajo de una superficie plana mayor.

Por arriba del nivel del mar la variación de la temperatura del aire con la altura juega un papel importante, reflejándose una disminución de la temperatura de superficies situadas sobre el nivel del mar.

La circulación de aguas produce perturbaciones en el campo de temperaturas, mediante pura conductividad, una anomalía de temperatura se difunde en el subsuelo mucho más lentamente que con la contribución de transporte convectivo de calor asociado a la migración de una fase fluida. Los movimientos de fluidos dan origen, por lo general, a perturbaciones locales del campo geotérmico. Las anomalías regionales pueden estar mal determinadas, muy frecuentemente a causa del mal conocimiento de la influencia correspondiente a las partes profundas del planeta. Perturbaciones del campo geotérmico de gran escala pueden ser observadas, por ejemplo, en las cuencas sedimentarias (Buntebarth, 1994).

Basados en sus efectos térmicos, los movimientos del agua subterránea se pueden diferenciar en dos tipos. En primer lugar, el agua meteórica que penetran en el subsuelo (hasta alcanzar la zona de saturación), a partir de la superficie, y que en su descenso es calentada; por lo tanto conduce a una disminución de las temperaturas del subsuelo. En segundo lugar, se tiene las aguas hidrotermales provenientes de estratos profundos de la corteza terrestre, las cuales en su ascenso calientan a las rocas enfriándose ellas mismas. Por lo general el segundo caso es local, en tanto que la influencia del primero es de una naturaleza más bien regional (Buntebarth, 1994).

De manera contrastante, las fuentes termales se pueden reconocer más fácilmente gracias a sus anomalías térmicas, y han sido aprovechadas desde la antigüedad. El campo de temperaturas a ellas asociado tiene una importancia sólo local; sin embargo las fuentes termales aisladas pueden ser un índice observable de una fuente mayor de calor yaciendo a profundidad.

Las fuentes que generan el calor proveniente del interior son las que ya se han mencionado previamente, sin embargo existen otras, documentadas por Smith, et al., (2002); estas son:

- El choque de meteoritos. Se sabe que la energía cinética de un meteoro se transforma en gran parte en energía calorífica, fundiendo y volatilizandando tanto el impactor como la roca que impactó. Como es lógico, cuanto mayores son el meteoro y su velocidad, mayor es la extensión del área afectada. Sin embargo, y debido a la baja conductividad térmica de las rocas, no se llega a fundir mucho material, salvo en grandes impactos a nivel planetario. Un impacto, de todas maneras produce también la fragmentación del terreno hasta una profundidad importante. Esto permite que el material fundido a profundidad ascienda a la superficie a través de estas fracturas (Smith, et al., 2002).
- La atracción gravitacional del Sol y la Luna generan el 10% del total del calor de la Tierra. Además de causar las mareas oceánicas, los esfuerzos generados por la atracción gravitacional deforman la parte sólida de la Tierra y aunque estas deformaciones son del orden de una parte en un millón, ocasionan un desplazamiento de cerca de 30 cm en la superficie terrestre. Por otra parte, la energía solar que recibe la Tierra es de casi 10^{24} cal/año.
- Calor inicial. Energía liberada durante la formación de la Tierra, hace 4500 millones de años, y que todavía está presente en la superficie (Smith, et al., 2002).

- Calor latente de cristalización del núcleo externo. Energía liberada en la continua cristalización del núcleo externo fluido (calor latente de cristalización). La discontinuidad entre el núcleo interno y el núcleo externo de la Tierra se encuentra a una temperatura y presión que corresponden a las de fusión del hierro. El núcleo interno se encuentra en estado sólido y el núcleo externo, en estado líquido. En la zona de transición, el fluido del núcleo externo está cristalizando continuamente y los elementos más ligeros, con menor punto de fusión, migran liberando energía gravitatoria. En este proceso, el núcleo interno (sólido) aumenta su tamaño a razón de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ y se libera energía en forma de calor (Smith, et al., 2002).

Otra fuente de calor de tipo mecánico es la que se produce en zonas de fallas activas, que traen como resultado el metamorfismo de tipo dinámico que es el resultado de los movimientos entre bloques; cerca de la superficie, las rocas se comportan como un sólido frágil. Por consiguiente, el movimiento a lo largo de una zona de falla, fractura y pulveriza las rocas (Tarbuck y Lutgens, 2000). Sobre la superficie, la fricción mecánica es una fuerza continua y persistente que se opone al movimiento, esta fricción genera calor, y se incrementa con la tensión que se origina en las rocas; la presión se concentra de tal manera que tritura a la roca en fragmentos pequeños hasta microscópicos. Estos se funden luego parcialmente, debido al calor provocado por el rozamiento; dicho proceso da origen a una roca denominada milonita, blastomilonita o pseudotraquilita caracterizada por la recristalización o metamorfismo parcial de los minerales preexistentes y el alineamiento de los mismos a lo largo del plano de cizalla. La cantidad de rocas metamórficas generadas únicamente por la formación de fallas en todo el mundo es pequeña cuando se compara con el metamorfismo regional. No obstante, en algunas áreas estas rocas son bastante abundantes (Tarbuck y Lutgens, 2000).

Un ejemplo de calor generado en zonas de fallas activas, es el del Valle de Querétaro, que es una cuenca rodeada por volcanes y fallas, localizada dentro de la parte norte y central de la Faja Volcánica Transmexicana. La columna estratigráfica del área de Querétaro consiste de un basamento regional Cretácico cubierto por una secuencia Terciaria de capas alternantes de sedimentos y rocas volcánicas (Centro de Geociencias, UNAM, 2007).

El Valle de Querétaro es una planicie horizontal localizada entre 1800 y 1810 msnm. La ciudad de Querétaro está localizada al este del valle y su infraestructura urbana está afectada por un sistema de fracturas y fallas con tendencia norte-sur conocido como Falla Central. El fracturamiento y la subsidencia representan graves problemas para muchas zonas urbanizadas del centro de la ciudad.

La estratigrafía cercana a la superficie debajo del centro de la ciudad, consiste de sedimentos fluviales o lacustres con tamaños de partículas que varían desde gravas, arenas y limos hasta arcillas, con capas interestratificadas de rocas piroclásticas y flujos de lava. En particular, las partículas con tamaños de arcillas están compuestas de diferentes clases de materiales arcillosos (minerales cristalizados y amorfos). Existe un sistema hidrotermal activo en el flanco oeste del Valle de Querétaro (Centro de Geociencias, UNAM, 2007).

El fallamiento regional que afecta el área está caracterizado por dos sistemas casi ortogonales activos desde el Mioceno, con las siguientes direcciones preferentes NNW-SSE y ENE-WSW. Varios sitios con actividad hidrotermal están alineados con la falla orientada N-S en el flanco oeste del Valle de Querétaro. En la parte sur de la Falla San Bartolomé, el Antiguo Hospital de Baños Termales es un edificio antiguo que data del Siglo XVI, el cual fue construido para hidroterapia y curaciones. En la parte norte de la falla, el agua caliente alcanza la superficie a través de manantiales artesanos que producen una vista impresionante de volcanes de lodo y vapor de agua, esta actividad hidrotermal, está asociada a las fallas activas presentes en la zona (Centro de Geociencias, UNAM, 2007).

II.4 CAUSAS DE ORIGEN MAGMÁTICO

El origen de los magmas ha sido un tema controvertido en geología casi desde el mismo principio de esta ciencia, la Teoría de la Tectónica de Placas ha respondido satisfactoriamente varias de las preguntas referentes al origen y composición de los magmas. Aunque ya se mencionó brevemente lo relacionado a la estructura de la Tierra y algo de la Teoría de la Tectónica de Placas, en este capítulo se profundizará sobre estos temas.

La separación en capas composicionales en el interior de la Tierra, es decir, de composición distinta, se produjo probablemente por la estratificación por densidades que tuvo lugar durante el período de fusión parcial de las primeras etapas de la historia de la Tierra (Tarbuck y Lutgens, 2000). Durante este período, los elementos más pesados, principalmente hierro y níquel, se fueron hundiendo a medida que los componentes rocosos más ligeros flotaban hacia arriba. Esta segregación del material sigue ocurriendo todavía, pero a un ritmo mucho más reducido. Debido a esta diferenciación química, el interior de la Tierra no es homogéneo. Antes bien, consiste en tres regiones químicas notablemente diferentes: núcleo, manto y corteza (Figura II.4).

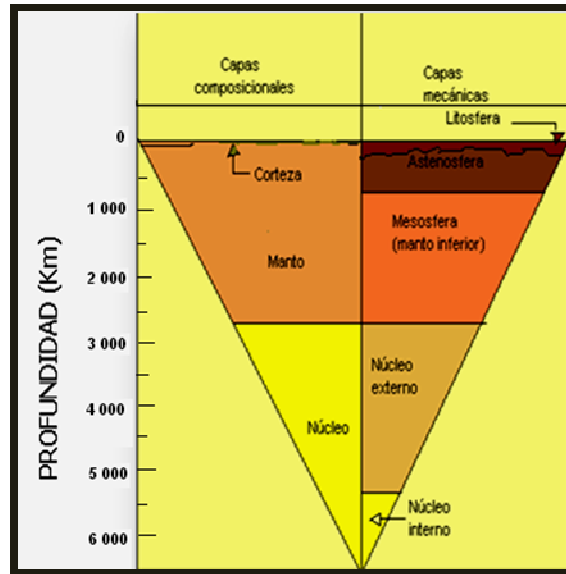


Figura II.4 Comparación de las capas mecánicas y composicionales de la Tierra y su profundidad (Modificada de Tarbuck y Lutgens, 2000).

La corteza es la capa externa comparativamente delgada, cuyo grosor oscila entre 3 Km en las cordilleras oceánicas y 70 Km en algunos cinturones montañosos como los Andes y los Himalayas. El manto, corresponde con una capa de roca sólida (rica en sílice) que se extiende hasta una profundidad de unos 2 900 Km. El núcleo, es una esfera rica en hierro con un radio de 3 486 Km (Tarbuck y Lutgens, 2000).

Dado que, tanto la presión como la temperatura afectan mucho al comportamiento mecánico (resistencia), así como a la densidad de los materiales de la Tierra, existen otras divisiones estructurales del interior de nuestro planeta. Por ejemplo, el núcleo, se divide en dos regiones que exhiben comportamiento mecánico diferente, está compuesto fundamentalmente por una aleación de hierro y níquel (Figura II.4). El núcleo externo es una capa metálica líquida de 2 270 Km de espesor. Esta zona, rodea al núcleo interno, una esfera sólida que tiene un radio de 1 216 Km (Tarbuck y Lutgens, 2000).

El núcleo es la esfera central más densa de la Tierra, que se extiende desde el borde inferior del manto hasta el centro de la Tierra; constituye alrededor de una sexta parte del volumen total y casi una tercera parte de su masa total. La presión en el centro es millones de veces mayor que la presión del aire en la superficie, y se interpreta que las temperaturas pueden superar los 6, 700°C (Tarbuck y Lutgens, 2000).

Aproximadamente el 82% del volumen terrestre está contenido dentro del manto, una capa gruesa sólida de casi 2 900 Km de espesor formada por rocas silicatadas que se extienden desde la base de la corteza hasta el núcleo externo líquido. El manto se divide en mesosfera o manto inferior, que se

extiende desde el límite núcleo-manto hasta una profundidad de 660 Km y manto superior, que continúa hasta la base de la corteza.

La corteza de la Tierra tiene un grosor medio inferior a 20 Km, lo que la convierte en la más delgada de las divisiones del interior de la Tierra. A lo largo de esta delgada capa, existen grandes variaciones de grosor. Las rocas de la corteza en el interior estable de los continentes tienen un grosor de aproximadamente 30 Km, sin embargo, en muy pocas regiones montañosas excepcionalmente destacadas, la corteza alcanza su mayor espesor, superando los 70 Km. La corteza oceánica por su parte, es mucho más delgada, entre 3 y 15 Km de grosor (Tarbuck y Lutgens, 2000). Además, las rocas de la corteza de las cuencas oceánicas profundas son composicionalmente diferentes, a sus correspondientes continentales.

La litósfera es una de las capas dentro de la división mecánica de la Tierra, consistente del manto externo y la corteza, forma una capa relativamente rígida y fría. Aunque esta capa está compuesta de materiales con composiciones químicas notablemente diferentes, tiende a actuar como una unidad que se comporta de manera similar frente a la deformación mecánica. Con un grosor medio de 100 Km, la litosfera puede extenderse 250 Km o más por debajo de los escudos. Dentro de las cuencas oceánicas, la profundidad de la litósfera es de sólo unos pocos Km debajo de las dorsales oceánicas y aumenta hasta casi 100 Km en las regiones de rocas de la corteza oceánica más antiguas y frías (Tarbuck y Lutgens, 2000).

Debajo de la litósfera se encuentra una capa blanda, relativamente débil, localizada en el manto superior y conocida como astenósfera. Los 150 Km, más o menos, superiores de la astenósfera se encuentran en unas condiciones de temperatura/presión bajo las cuales se produce una pequeña cantidad de fusión.

Es importante destacar que la resistencia de los materiales terrestres está en función de su composición, así como de la temperatura y la presión de su entorno. No toda la litósfera es frágil, aunque las rocas de la litosfera se debilitan progresivamente al aumentar la profundidad debido al incremento de la presión y la temperatura. A la profundidad de la astenósfera superior, las rocas están muy cerca de su temperatura de fusión, de manera que son fácilmente deformables; por lo tanto, la astenósfera es débil porque está cerca de su punto de fusión. Sin embargo, en el material localizado por debajo de esa zona, el aumento de la presión compensa los efectos de la mayor temperatura, por consiguiente, esos materiales van aumentando gradualmente su rigidez con la profundidad, formando el manto inferior más rígido. Pese a su mayor resistencia, los materiales del manto inferior son todavía capaces de un flujo lento y muy gradual (Tarbuck y Lutgens, 2000).

En la corteza, el flujo de calor se produce por el proceso de conducción que es la transferencia de calor a través de la materia por actividad molecular, se produce a un ritmo relativamente lento en las rocas de la corteza. Por tanto, la corteza tiende a actuar como un aislante frío en la parte superior y caliente en la parte inferior.

Ciertas regiones de la corteza terrestre tienen ritmos de flujo de calor mucho mayores que otras, en concreto, a lo largo de los ejes de las cordilleras mesoceánicas, donde la corteza tiene sólo unos pocos kilómetros de grosor, las velocidades de flujo de calor son relativamente elevadas; por el contrario, en los antiguos escudos se observa un flujo de calor relativamente bajo. Esto quizá se deba a que esas zonas tienen la raíz litosférica gruesa que aísla de manera eficaz la corteza del calor astenosférico inferior. Otras regiones de la corteza exhiben un elevado flujo de calor por intrusiones ígneas ubicadas cerca de la superficie terrestre (Tarbuck y Lutgens, 2000).

Para que un modelo de manto funcione, independientemente de cual se trate, es necesario que explique la distribución de temperaturas calculada para esta capa. Dentro de la corteza se produce un gran aumento de temperatura, pero la misma tendencia no continúa del manto hacia abajo. Antes bien, el aumento de la temperatura con la profundidad en el manto es mucho más gradual. Esto significa que el manto debe tener un método eficaz de transmisión de calor desde el núcleo hacia afuera, dado que las rocas son conductoras de calor relativamente malos, se ha concluido que existe alguna forma de transporte de masa de roca dentro del manto, que corresponde con la convección, la cual permite la transferencia de calor mediante el movimiento o la circulación en una sustancia. Por consiguiente, las rocas del manto deben ser capaces de fluir, es decir presentan convección (Tarbuck y Lutgens, 2000).

El flujo convectivo del manto es el proceso más importante que actúa en el interior de la Tierra. Este flujo, térmicamente impulsado, es la fuerza que propulsa las placas litosféricas rígidas a través del planeta, y genera en última instancia las cordilleras montañosas de la Tierra y la actividad volcánica y sísmica de todo el mundo.

Según la Teoría de la Tectónica de Placas, el manto superior junto con la corteza se comportan como una capa fuerte y rígida que es la litosfera mencionada anteriormente, que está por encima de la astenósfera. Además, la litósfera está dividida en numerosos fragmentos denominados placas que están en movimiento y cambian continuamente de tamaño y forma. Las placas se mueven como unidades coherentes en relación con las otras placas. Aunque el interior de las placas puede deformarse, las principales interacciones entre las placas individuales se produce a lo largo de sus bordes que son de los siguientes tipos (Tarbuck y Lutgens, 2000):

- Divergentes: cuando las placas se separan, se produce el ascenso del material magmático desde el manto para crear nuevo piso oceánico (Figura II.5a).
- Convergentes: Donde las placas se juntan, lo que provoca la subducción de la litósfera oceánica en el manto (Figura II.5b).
- De falla transformante: Donde las placas se desplazan lateralmente una respecto de la otra sin la producción o destrucción de la litósfera (Figura II.5c).

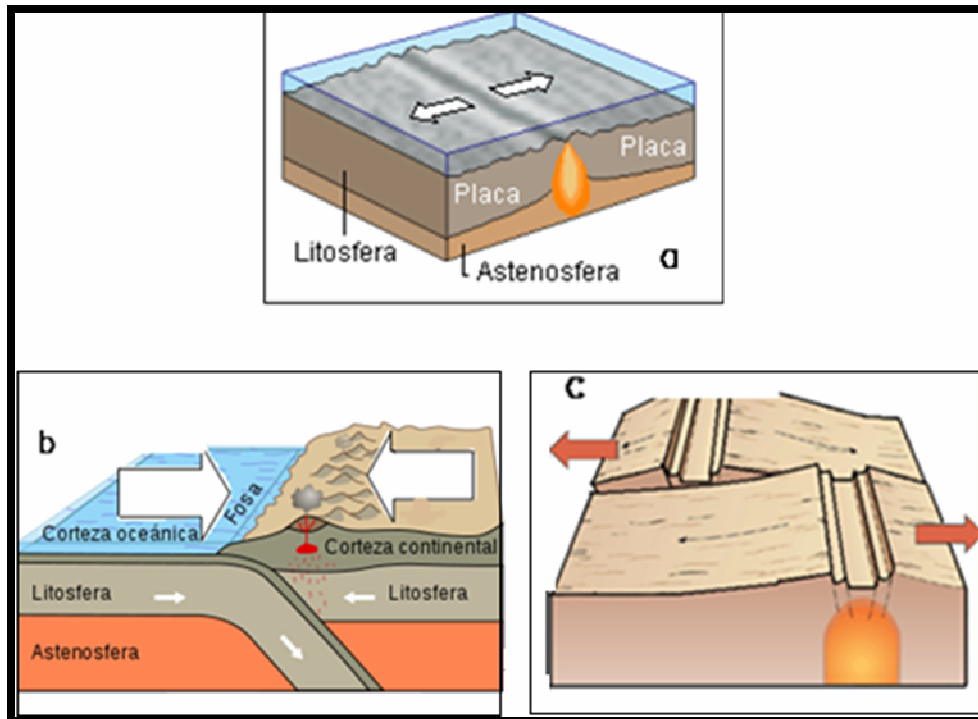


Figura II.5 Tipos de límites entre placas: a) divergente, b) convergente, c) de falla transformante (Tomada de blogger.com, 2008).

En función de las evidencias disponibles, la corteza y el manto terrestres están compuestos fundamentalmente de rocas sólidas, no fundidas. Aunque el núcleo externo es fluido, está formado por un material rico en hierro, muy denso y que está situado a bastante profundidad dentro de la Tierra. Así pues ¿cuál es el origen de los magmas que producen la actividad ígnea causante del calor proveniente del subsuelo?

Se ha propuesto que los magmas se originan cuando se funden rocas esencialmente sólidas localizadas en la corteza y el manto superior. La forma más evidente para generar magma a través de roca sólida consiste en elevar la temperatura por encima del punto de fusión de la roca. En un ambiente próximo a la superficie, las rocas graníticas ricas en sílice empiezan a fundirse a temperaturas cercanas a los 750°C, mientras que las rocas basálticas deben ser calentadas a temperaturas superiores a los 1 000° C, que es cuando

comienzan a fundirse. Además de un aumento de la temperatura, una roca que está próxima a su punto de fusión puede empezar a fundirse si disminuye la presión de confinamiento, o si se introducen líquidos (volátiles). En el proceso de generación de magmas, el papel que desempeña el calor, la presión y las sustancias volátiles es muy importante (Tarbuck y Lutgens, 2000).

A partir del conocimiento del gradiente geotérmico de la Tierra, se sabe que la temperatura a 100 Km de profundidad oscila entre 1 200° C y 1 400° C, mientras que la temperatura en el límite núcleo-manto se calcula que es de aproximadamente 4 500° C y puede superar los 6 700° C en el centro de la Tierra (Figura II.6).

Hay varias maneras por medio de las cuales el calor desempeña su papel en la formación de los magmas. En primer lugar, en las zonas de subducción, se piensa que la fricción genera calor conforme las rocas se deslizan unas sobre otras. En segundo lugar, las rocas pueden calentarse durante la subducción a medida que descienden hacia una zona de mayor temperatura. En tercer lugar, el material caliente profundo puede ascender y fundir las rocas localizadas cerca de la superficie. Aunque todos estos procesos pueden generar magma, las cantidades suelen ser pequeñas y la distribución está muy localizada. En realidad, la mayor parte del magma se genera sin la adición de calor (Tarbuck y Lutgens, 2000).

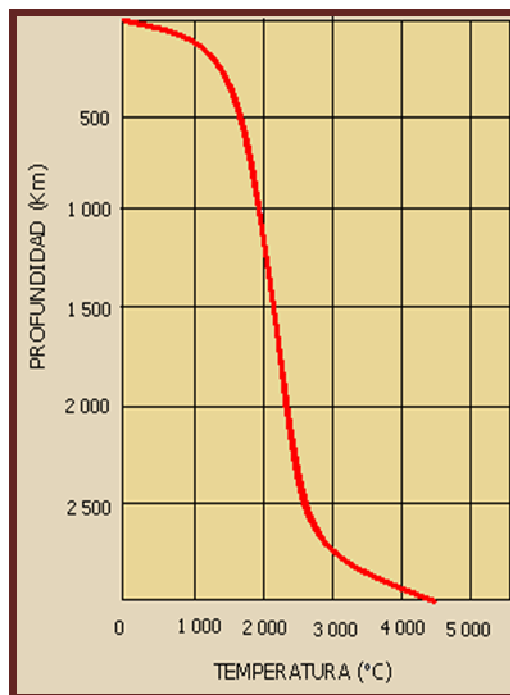


Figura II.6 Gráfico que muestra de manera esquemática la distribución de temperaturas calculadas para el manto y la corteza. Obsérvese que la temperatura aumenta significativamente desde la superficie hasta la base de la litósfera y que el gradiente de temperatura es mucho menor en el manto (Modificada de Tarbuck y Lutgens, 2000).

Si la temperatura fuera el único factor determinante para que una roca se funda o no, nuestro planeta sería una bola fundida cubierta por una fina capa exterior sólida. La razón es que la presión también aumenta con la profundidad, siendo otro factor relevante para la formación de cuerpos magmáticos. La tendencia de la roca a fundirse es otro factor importante para la formación de magma.

La fusión que se acompaña de un aumento de volumen, se produce a temperaturas más altas en profundidad debido a la presión de confinamiento (Figura II.7) (Tarbuck y Lutgens, 2000).

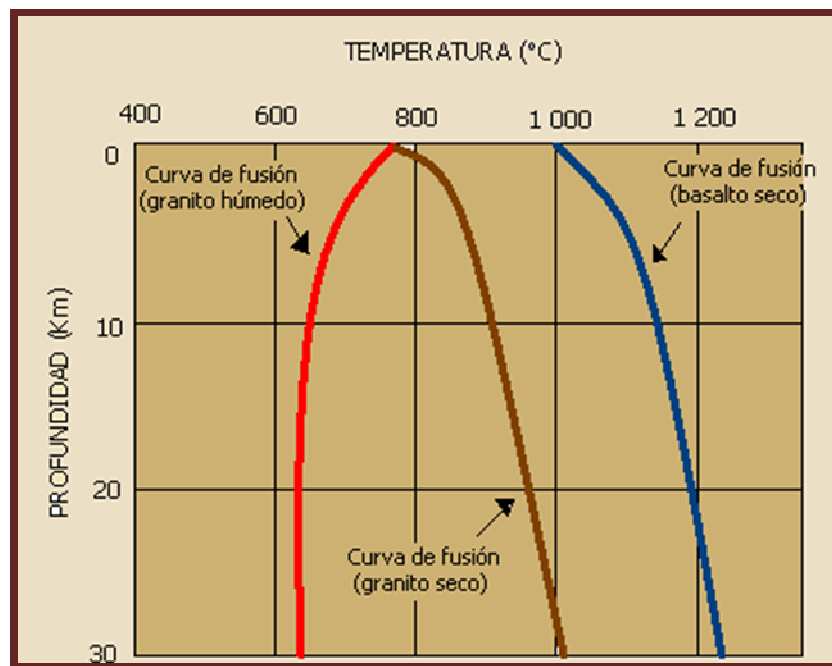


Figura II.7 Esquema que muestra las curvas idealizadas de temperatura de fusión. Estas curvas muestran las temperaturas mínimas necesarias para fundir una roca dentro de la corteza terrestre. El granito y el basalto anhidridos se funden a temperaturas cada vez más elevadas conforme aumenta la profundidad. Por el contrario, la temperatura de fusión del granito húmedo disminuye a medida que aumenta la presión de confinamiento (Modificada de Tarbuck y Lutgens, 2000).

Con un aumento de la presión de confinamiento se produce un incremento de la temperatura de fusión de las rocas. A la inversa, la reducción de la presión de confinamiento reduce la temperatura de fusión de una roca.

Cuando la presión de confinamiento disminuye, se dispara la fusión, esto puede ocurrir cuando la roca asciende como consecuencia de una corriente convectiva ascendente, desplazándose así a zonas de menor presión (Tarbuck y Lutgens, 2000). Este proceso es responsable de la generación de magmas a lo largo de las dorsales oceánicas donde las placas se están separando (Figura II.8).

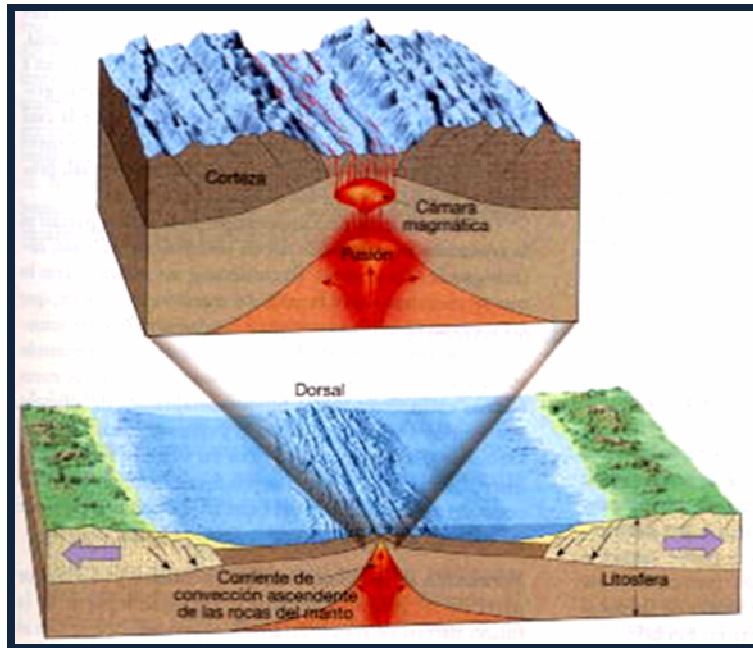


Figura 11.8 Esquema que muestra como conforme asciende una roca caliente del manto, se desplaza continuamente hacia zonas de menor presión. Esta disminución de la presión de confinamiento puede desencadenar la fusión, incluso sin calor adicional (Tomada de Tarbuck y Lutgens, 2000).

Otro factor importante que afecta la temperatura de fusión de las rocas es su contenido de agua. El agua y otras sustancias volátiles actúan al igual que la sal para fundir el hielo, es decir, las sustancias volátiles hacen que la roca se funda a temperaturas inferiores, además el efecto de los volátiles se incrementa con el aumento de la presión. Por consiguiente, una roca “húmeda” en profundidad tiene una temperatura de fusión mucho menor que una roca “seca” de la misma composición y bajo la misma presión de confinamiento (Figura 11.8). Por consiguiente, además de la composición de una roca, su temperatura, la profundidad (presión de confinamiento) y su contenido acuoso son los elementos que determinan si esa roca estará en estado sólido o líquido (Tarbuck y Lutgens, 2000).

Las sustancias volátiles desempeñan un papel importante en la generación de magmas en regiones donde láminas frías de litósfera oceánica descienden hacia el manto. Conforme una placa oceánica se hunde, el calor y la presión expulsan el agua de las rocas de la corteza subducida. Estas sustancias volátiles, migran hacia el manto caliente que se encuentra por encima. Se interpreta que este proceso disminuye la temperatura de fusión del manto lo suficiente como para generar pequeñas cantidades de fundidos.

Una vez que se forma suficiente roca fundida, ascenderá flotando hacia la superficie. En un ambiente continental, el cuerpo magmático puede “estancarse” debajo de las rocas de la corteza, que están muy cerca de su

temperatura de fusión. Esto provoca la generación de magmas secundarios ricos en sílice.

Los principales recursos geotérmicos se localizan preferentemente en las proximidades de los límites entre las diversas placas tectónicas en las que está fragmentada la litósfera. Particularmente en los límites de tipo convergente, donde también suelen ocurrir fenómenos de vulcanismo y sismicidad, es muy frecuente la formación de magma que eventualmente puede actuar como fuentes de calor para dar lugar a sistemas geotérmicos. De hecho, los países como México ubicados en o cerca de esos sitios son los que poseen más recursos geotérmicos.

Cuando el magma inicia su camino ascendente desde el manto superior y alcanza la corteza oceánica o la continental, -ya sea en dorsales oceánicas, puntos calientes (sitios ubicados encima de sistemas de subducción), o fracturas corticales-, disminuye la presión y el calor, que da origen al llamado proceso de diferenciación magmática, que consiste en la cristalización de minerales en una serie progresiva conforme disminuye la temperatura, es entonces cuando se libera el agua llamada magmática, que asciende junto con otros fluidos o volátiles (Figura II. 9).

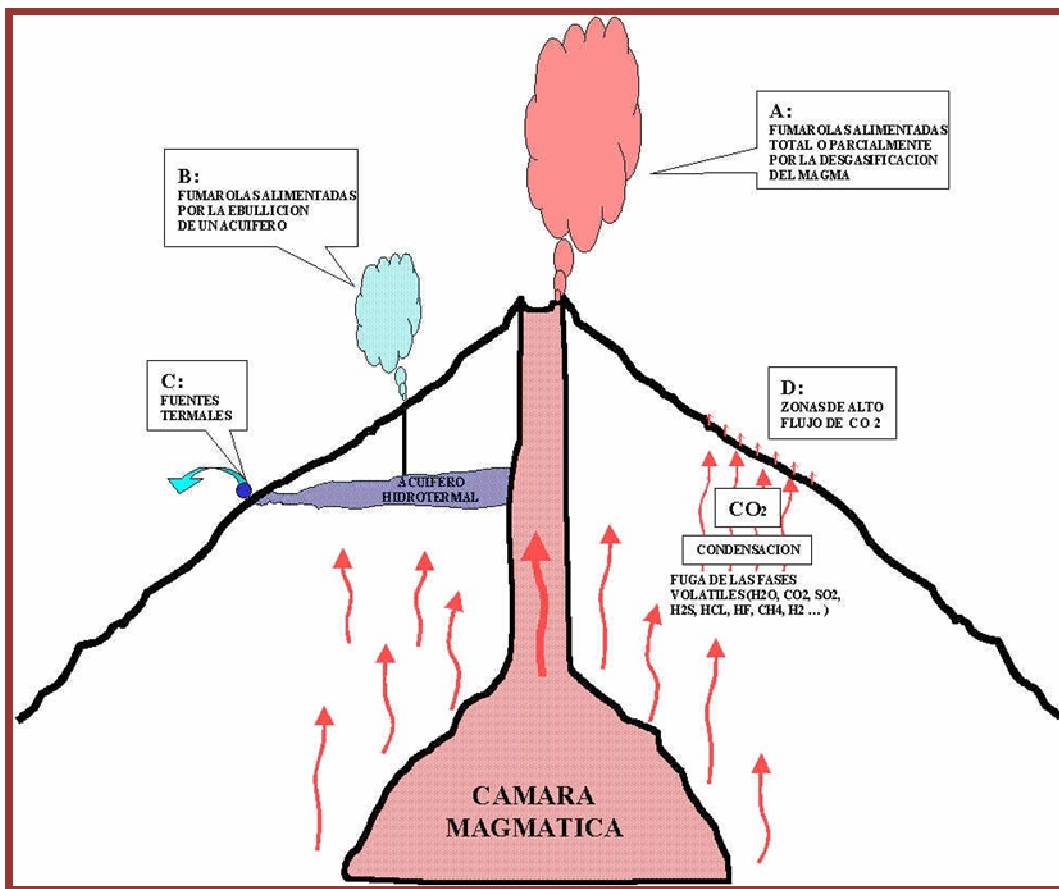


Figura II.9 Esquema de un sistema hidrotermal asociado a vulcanismo (Tomado de Aguilera, 2009).

El agua de un sistema hidrotermal puede ser meteórica (proveniente de lagos, lluvia, del subsuelo) o magmática, que se libera junto con otros fluidos o volátiles de un magma ascendente por disminución de presión y temperatura. En la gran mayoría, el hidrotermalismo se debe a este último tipo de aguas. La variación en la temperatura y en la densidad de los fluidos conducen a una circulación convectiva dentro de la corteza, la cual produce una transferencia de calor y minerales a gran escala. El hidrotermalismo se desarrolla en cualquier lugar de la corteza terrestre donde el agua coexiste con una fuente de calor (Pantoja y Gómez, 2004).

La formación de un sistema hidrotermal requiere necesariamente de la participación de fluidos calientes; en muchos casos estos fluidos hidrotermales transportan en solución sustancias de interés económico. Las características fisicoquímicas de estos fluidos tales como la salinidad, presión y temperatura, determinan el tipo y lugar de precipitación de su contenido disuelto. La circulación de fluidos hidrotermales en el subsuelo se debe en parte a las condiciones geológicas de la roca encajonante y a la ubicación de la fuente de calor que en ocasiones como ya se mencionó, puede ser la misma fuente de los fluidos (González, 1999).

II.5 CAUSAS DE ORIGEN QUÍMICO

En general, en la gran mayoría de las reacciones químicas hay flujo de energía entre el sistema y su campo de influencia, por lo cual podemos extender la definición de reacción química e involucrar la energía cinética (calor) como un reactivo o producto; esta es la razón principal por la que no es extraño que diversos materiales de la corteza reaccionen químicamente entre sí, generando calor.

Al añadir el ácido sulfúrico sobre el agua, se produce un desprendimiento de calor debido a lo que se llama calor de disolución. Este calor hace que se caliente el agua que se va convirtiendo poco a poco en una disolución de ácido sulfúrico en agua. Si la disolución adquiere una temperatura suficiente, se produce la evaporación de parte del agua, pero el agua y el ácido no se separan porque están formando una disolución. Si la disolución se calentara para evaporar el agua, también se formarían vapores de SO_3 (Campoblanco y Gómero, 2000).

El azufre eliminado por los volcanes extrae el oxígeno del agua, disociando sus moléculas para formar SO_2 y SO_3 , gases de olores sofocantes muy solubles en el agua, que luego forman H_2SO_4 que produce mayor acidez (consume el oxígeno del entorno), acompañado de reacción exotérmica con la que se puede producir calor suficiente para generar una anomalía térmica. A través de las fracturas y hendiduras de la corteza oceánica, en ocasiones sólo brota gas, agua y soluciones hidrotermales cargadas de sulfuro y minerales a grandes temperaturas originando las fumarolas y megafumarolas subacuáticas,

muchas de ellas, arrojan agua ennegrecida por presencia de sulfuros, como ocurre en la región de Jáltipan, Veracruz (Campoblanco y Gomero, 2000).

La actividad volcánica cargada de gas, azufre, ceniza e infinidad de isótopos y otros elementos químicos expulsados, constituye un caldo químico activado por altas presiones y temperaturas, que realiza reacción química, termoquímica y energética que aunque no ha sido muy investigado, sin embargo, merece la pena hacerlo, como una fuente geotérmica importante.

Si se considera la reacción energética que realiza el azufre (S) eliminado por los volcanes submarinos, se tiene la siguiente ecuación termodinámica (Campoblanco y Gomero, 2000):

- 1) $S + O_2 = SO_2 + \text{calor de formación Gas muy sofocante y}$
- 2) $2SO_2 + O_2 = 2 SO_3 + \text{calor de formación soluble en agua}$
- 3) $2SO_3 + 2 H_2 O = 2 H_2SO_4 \text{ (Acido Sulfúrico).}$

En ambientes profundos del mar, el contenido de oxígeno es escaso, pero el azufre (S), gases y cenizas que emergen de los volcanes a grandes presiones y temperaturas, disocian y desintegran la estructura bipolar del agua capturando el O_2 para formar SO_2 y SO_3 formando luego el ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Mientras tanto, el hidrógeno (H) liberado durante la disociación de la molécula del agua, reacciona con el azufre (S) formando el sulfuro de hidrógeno (H_2S) conforme a la siguiente ecuación termodinámica (Campoblanco y Gomero, 2000):



La combinación de H y S se facilita cuando la temperatura se eleva creando condiciones reductoras en el ambiente marino. El H_2S o ácido sulfhídrico también emerge de los gases y productos volcánicos. Muchas "Mareas Rojas" son precedidas por coloraciones negruzcas del océano asociado al olor característico del H_2S (Campoblanco y Gomero, 2000).

El calor asociado a las reacciones químicas, todavía no ha sido ampliamente difundido, sin embargo, puede resultar de gran importancia a la hora de evaluar las fuentes de energía geotérmica.

TEMA III CLASIFICACIÓN Y EXPLORACIÓN DE LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS.

III.1 GENERALIDADES

Según Reyes (1987), se define como “campo geotérmico” al área que puede tener una extensión muy variable, bajo la cual existe un fluido con altas temperaturas, que es potencialmente aprovechable para la producción de electricidad, en el caso de que las temperaturas sean de 100° C y más, o bien, como fuente de calor para otros usos diversos si las temperaturas son menores.

Generalmente, los sistemas geotérmicos están constituidos por una fuente de calor, fluidos de trabajo (acuífero termal y acuífero de recarga) y una capa de roca sello que facilite la presurización del sistema e impida las fugas de energía (Figura III.1) (Torres, et al., 1993).

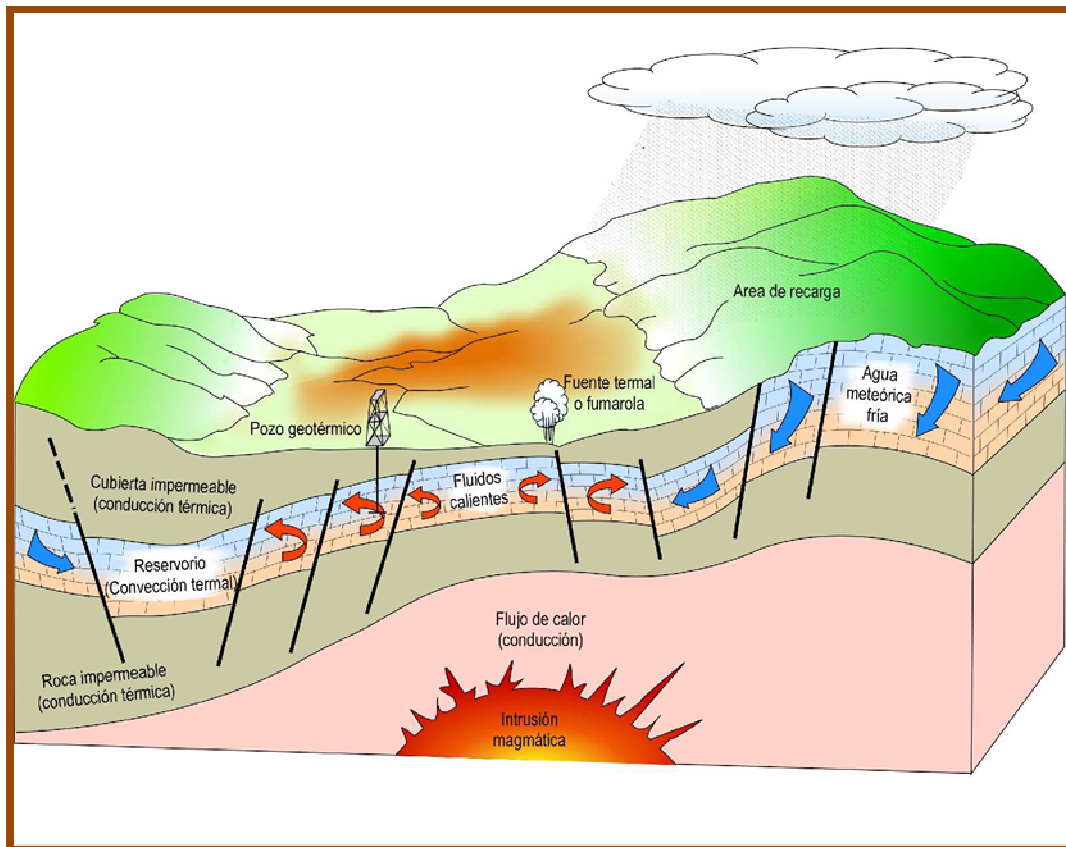


Figura III.1 Representación esquemática de un campo geotérmico ideal (Tomada de Dickson y Fanelli, 2004).

En la mayoría de los campos geotérmicos, las altas temperaturas son causadas por la presencia de cuerpos intrusivos calientes o por estructuras relacionadas con actividad volcánica reciente, siendo éstas, las fuentes de calor más comunes. Por ello, en áreas geotérmicas es normal encontrar altas

temperaturas a poca profundidad, dichas condiciones en general, son el resultado de (Torres, et al., 1993):

- Intrusión de roca fundida o magma proveniente de grandes profundidades de la Tierra que es llevada a los altos niveles de la corteza terrestre. Si bien un intrusivo no se puede observar directamente, su presencia se puede interpretar con base en manifestaciones superficiales relacionadas con él, por ejemplo, alineamientos circulares de volcanes, presencia de diques hipabisales, sistemas de fracturamiento atribuibles a efectos de empuje, abombamientos superficiales, etcétera (Torres, et al., 1993).
- Flujo de calor superficial más alto que el promedio, con una tendencia a aumentar el gradiente de temperatura con la profundidad, es decir, gradientes geotérmicos anómalos. Sabiendo que el gradiente geotérmico es el incremento de la temperatura con respecto a la profundidad, su manifestación superficial puede detectarse de dos formas: zonas de anomalía termal superficial (suelos calientes, fuentes termales, etc.) y alteración hidrotermal (por ejemplo, zonas de silicificación, de propilitización, precipitación de carbonatos, etc.). También se producen alteraciones en la vegetación como: pérdida de ésta, modificaciones en su crecimiento, presencia de especies resistentes, etc.
- Ascenso de agua subterránea que ha estado circulando a profundidades de dos a cinco kilómetros, tal es el caso de los géiser (Torres, et al., 1993).
- Calentamiento anómalo de rocas poco profundas por decaimiento de elementos radiactivos.
- Transferencia de calor por movimiento de placas tectónicas, como en las fallas de transformación.
- Calentamiento producido por el movimiento de bloques en el caso de fallas activas, ya sean normales, inversas o laterales (Torres, et al., 1993).

Para que los recursos geotérmicos tengan un desarrollo económico eficaz necesitan brindar grandes cantidades de calor hacia la superficie de la Tierra. Al respecto, la naturaleza mediante el ciclo hidrológico provee agua la cual, normalmente se difunde a través de fracturas y poros, así como otros espacios dentro de la roca. El agua tiene como característica que presenta alta capacidad calorífica y un alto calor latente de vaporización, por lo tanto, es un fluido ideal para transferir calor (Torres, et al., 1993).

La densidad y viscosidad del agua decrecen conforme aumenta la temperatura. El agua calentada a profundidad es más ligera que el agua fría localizada en las rocas circundantes y, por lo tanto, está sujeta a fuerzas de empuje. Si el calentamiento es demasiado grande para empujar y superar la

resistencia del flujo de la roca, el agua calentada subirá hacia la superficie terrestre. Cuando sube, el agua más fría se mueve para reemplazarla, en este proceso, la convección natural se establece alrededor del agua subterránea y sobre la fuente de calor. La convección brinda grandes cantidades de calor dentro del alcance de los pozos y es, por lo tanto, responsable de una clase económicamente importante de recursos geotérmicos. En algunas fuentes hidrotermales la temperatura nunca alcanza el punto de ebullición debido al flujo rápido de agua y el sistema no genera vapor. Sin embargo, otros sistemas liberan presión originando que sean alcanzados puntos de ebullición locales y estos produzcan vapor. El vapor asciende y encuentra rocas más frías donde una parte se condensa, calentando la roca, y la presión disminuye, aumentando la vaporización. La temperatura y la presión de un campo de vapor, varía lentamente con la profundidad (Torres, et al., 1993).

Otro factor esencial para el establecimiento de un sistema geotérmico es la presencia de rocas de alta permeabilidad dentro del campo y de muy baja permeabilidad en su cima. La permeabilidad es la medida de la capacidad de las rocas para transmitir fluidos como resultado de las diferencias de presión. El flujo toma lugar en los poros, entre los granos de los minerales y en los espacios creados por fracturas y fallas (Torres, et al., 1993).

Por otra parte, la porosidad es el término dado a la fracción de espacios vacíos en un volumen de roca. Desde el punto de vista cualitativo la **porosidad** es la capacidad de una roca de tener poros, entendiendo por poro cualquier espacio de una masa rocosa que no esté ocupado por un material sólido, sino por un fluido (agua, aire, petróleo, etc.).

Cuantitativamente, la porosidad se define como el espacio total ocupado por poros en un volumen determinado de roca (Castany, 1988).

$$\phi = \frac{V_h}{V} \times 100 \quad \text{donde:}$$

ϕ = porosidad total de la roca

V_h : Volumen de huecos en la roca

V : Volumen total de la roca

La porosidad promedio de algunos tipos de rocas o sedimentos es de: Gravas, 25-40%; arenas y gravas, 25-30%; arenas, 25 a 47%; arcillas, 44-50%; limos, 34 a 50%; caliza, 1-17%; arenisca, 4-26% y yeso, 4% (Blatt, et al., 1980).

El interés hidrogeológico se centra en los poros intercomunicados, de manera que no todos los poros son iguales, y en función de su tamaño el agua circulará más o menos libremente, a esto se le llama porosidad eficaz (ϕ_e). A grandes

rasgos, se distinguen tres tipos de porosidad si se considera el tamaño del hueco (Blatt, et al., 1980):

Microporosidad <0.1 mm

Porosidad capilar 0.1-2 mm

Macroporosidad > 2 mm

Los poros pueden ser el resultado de procesos muy diferentes; los que se deben a lo que se denomina *porosidad primaria* (Figura III.2), se originan al mismo tiempo que las rocas en los que se encuentran, por ejemplo los que existen entre los diversos fragmentos que constituyen una roca detrítica (arena de una playa o de una duna, depósitos aluviales de un río, etc.). La permeabilidad primaria es originada por la porosidad intergranular y, usualmente, decrece con la profundidad debido a la compactación y cementación (Blatt, et al., 1980).

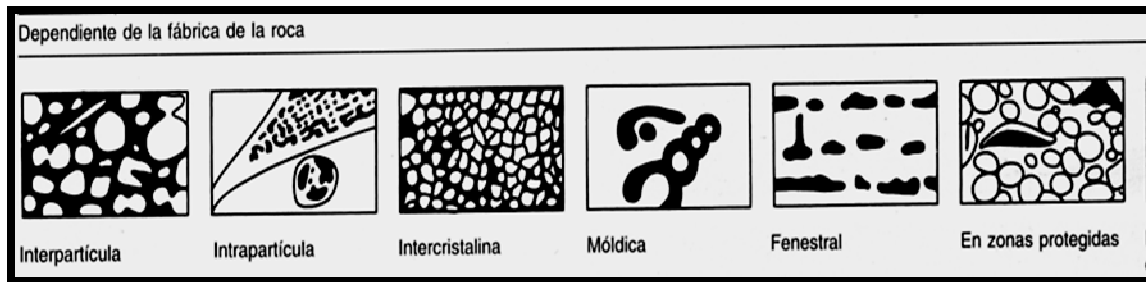


Figura III.2 Tipos de porosidad primaria (Tomada de Adams, et al., 1997).

La *porosidad secundaria* (Figura III.3), se origina con posterioridad a la formación de la roca y a menudo por procesos completamente diferentes a los que dieron origen a aquella, por ejemplo, fracturas o diaclasas en una roca fracturada, o lo que quizás es mejor conocido, la red de conductos y cavidades producida por disolución de rocas solubles (simas, sumideros o cuevas). La permeabilidad secundaria ocurre en espacios abiertos debido a fallas, fracturas e intersección de fracturas (Blatt, et al., 1980).

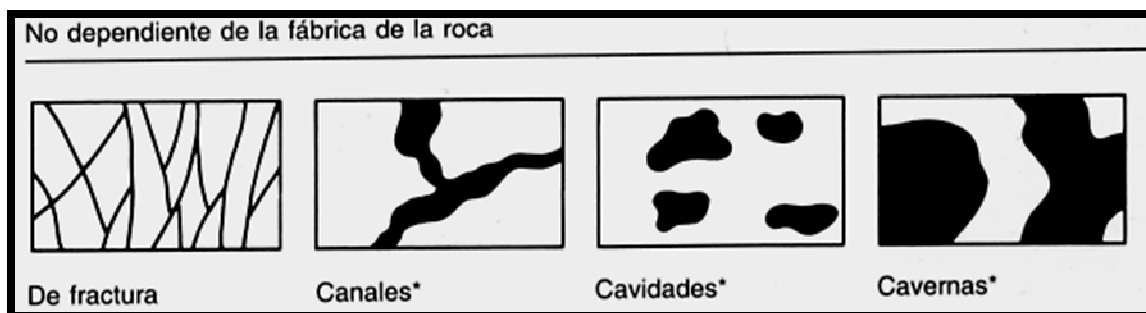


Figura III.3 Tipos de porosidad secundaria (Tomada de Adams, et al., 1997).

Estas diferencias genéticas llevan a la par otros contrastes de mayor relevancia: en las rocas con porosidad primaria intergranular, la porosidad se aprecia en muestras de tamaño pequeño ("*porosidad en pequeño*") y su distribución es más o menos homogénea en el seno de la roca; por el contrario, en las rocas de porosidad secundaria, ésta suele tener una distribución muy irregular (condicionada por las características del proceso que genera la porosidad), de modo que pueden existir bloques de gran tamaño absolutamente carentes de poros, separados entre sí por conductos de mayor o menor envergadura; el resultado es que, por un lado la porosidad sólo se manifiesta si se consideran volúmenes grandes de roca ("*porosidad en grande*"); por otro lado, el comportamiento de tales rocas suele ser solamente heterogéneo (es decir, diferente de unos puntos a otros) y anisótropo (diferente en distintas direcciones); estas características influyen decisivamente en el comportamiento hidrogeológico de las rocas (Blatt, et al., 1980).

Igualmente importantes son también las consecuencias que derivan del hecho de que los poros pueden tener tamaño distinto: son muy pequeños los que existen entre partículas de arcilla (muy por debajo de 1 mm), pero pueden ser de orden métrico o superiores como las producidas por disolución.

En los poros de muy pequeño tamaño el agua está firmemente adherida a las paredes del poro por varios mecanismos, de los cuales el más importante es la tensión superficial (Castany, 1988); en tales poros el agua es retenida contra la acción de la gravedad ("*capacidad de retención específica*") y no puede fluir libremente. Por el contrario, en los poros de mayor tamaño (supercapilar) una parte del agua (la no retenida del modo descrito) fluye libremente por gravedad ("*agua gravífica*") (Castany, 1988).

En consecuencia, la porosidad describe la capacidad de las rocas para albergar agua, pero no la cualidad -tan importante desde el punto de vista hidrogeológico- de que el agua pueda circular en el seno de la roca. Esta última cualidad es la conductividad hidráulica, que requiere no sólo que la roca sea porosa sino que además los poros tengan un cierto tamaño para contener "agua gravífica"; a la porosidad correspondiente al agua gravífica se la denomina porosidad eficaz (Castany, 1988).

La porosidad eficaz depende de la forma, tamaño y disposición de los granos; disminuye con el diámetro y aumenta con la uniformidad. La porosidad interconectada proporciona direcciones de flujo para los fluidos y origina la permeabilidad.

Evidentemente para un sistema geotérmico, es necesario que las rocas tengan una buena porosidad eficaz, a fin de que los fluidos circulen lo más libremente posible.

Existen algunas clasificaciones de los sistemas geotérmicos que dependen de variables como la Temperatura, la naturaleza del ambiente geológico, o el régimen de transferencia de calor.

A continuación se describen sus características elementales.

III.2 CLASIFICACIÓN DE LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS

III.2.1 Sistemas Geotérmicos Convectivos

También son conocidos como Sistemas hidrotermales básicos, este tipo de sistemas están asociados con ambientes de alta porosidad y permeabilidad, relacionado con intrusiones silíceas someras de edad reciente e incluye, prácticamente, a casi todos los sistemas geotérmicos desarrollados y explotados hasta la fecha (Torres, et al., 1993).

La fuente de calor son las intrusiones magmáticas, dichas intrusiones se presentan principalmente en ambientes geológicos específicos, tales como: crestas oceánicas (zonas de expansión), márgenes convergentes (zonas de subducción), “rift continental” y anomalías térmicas dentro de las placas. Asimismo, estos sistemas están caracterizados por la circulación natural de un fluido de trabajo donde el calor es transportado por el mismo fluido; de esta forma, el proceso de transferencia de calor se debe, principalmente, a la circulación del fluido en el lugar de la transferencia por la conducción de las rocas. Dentro de esta categoría de sistemas existen dos subdivisiones generalmente reconocidas (Torres, et al., 1993):

- a) Sistemas de vapor dominante o sistema de vapor de alta entalpía

Este tipo de sistemas o yacimientos geotérmicos están formados de vapor originado de la ebullición del agua en la profundidad, el cual asciende, a través de fracturas, hasta zonas cercanas a la superficie donde se condensa y se drena como líquido a través de la roca porosa, siguiendo un patrón de flujo a contracorriente. En estos sistemas, el vapor es la fase que controla el perfil de la presión-profundidad (Figura III.4).

- b) Sistemas de líquido dominante de alta y baja entalpía

Estos yacimientos se caracterizan por producir aguas presurizadas con temperaturas altas (150 a 350° C), intermedias (90 a 150° C) y bajas (90° C). Los fluidos de éstos, al iniciar su ascenso a la superficie, sufren un decremento en su presión, de tal forma que una fracción de éste pasa como fase vapor,

mientras que la fracción remanente permanece como líquido a presión (Figura III.4). En estos sistemas el agua líquida es la fase que controla el perfil de la presión-profundidad; a este tipo de sistemas dependiendo del contenido calorífico de sus fluidos, se les conoce como sistemas de (Arellano Gómez et al., 2008):

Alta entalpía. Sistemas de salmuera súper caliente, con temperaturas entre 200°C y más de 300°C.

Baja entalpía. Sistemas con salmueras calientes, con temperaturas entre los 100°C y 200°C aproximadamente. Son más abundantes que los anteriores en una proporción de 50 a 1, se encuentran en casi todos los países del mundo, que tienen actividad volcánica reciente.

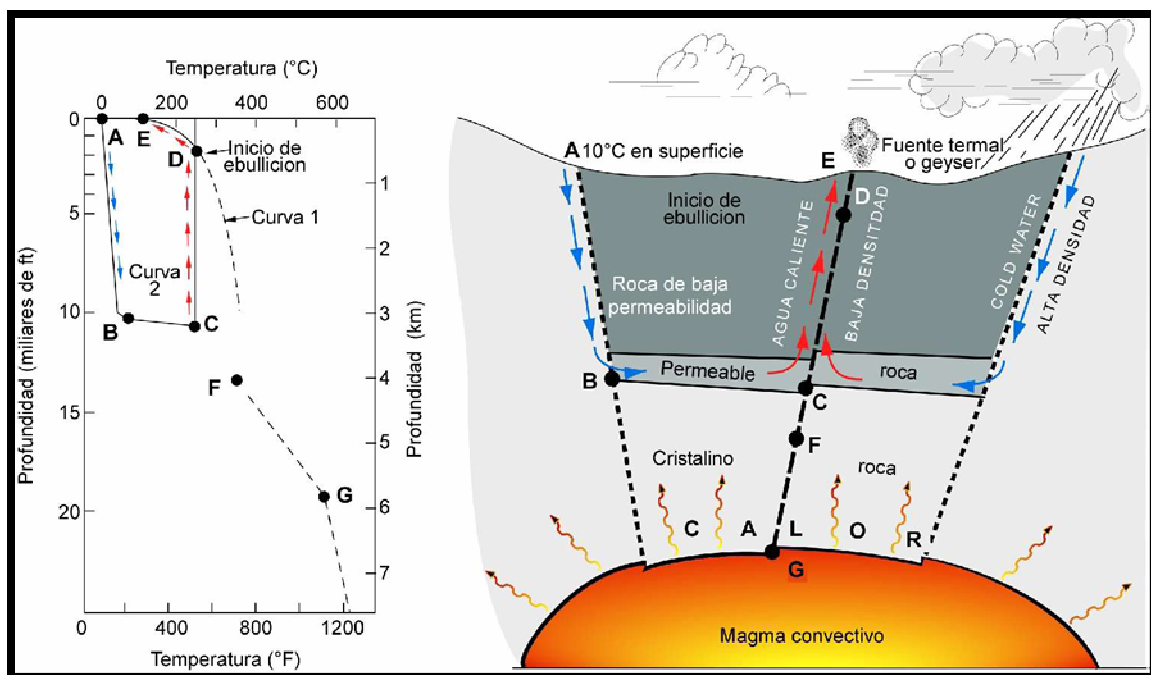


Figura III.4 Modelo de un sistema geotérmico. La curva 1 es la curva de referencia para el punto de ebullición del agua pura. La curva 2 muestra el perfil de temperatura a lo largo de una típica ruta de circulación desde la recarga en el punto A hasta la descarga en el punto E. (Tomada de Dickson y Fanelli, 2004).

Generalmente los primeros son los que se explotan en la actualidad con fines de producción de energía eléctrica, mientras que los segundos son aprovechados para plantas de ciclo binario y en aplicaciones de calefacción, procesado de alimentos, etc. Esta clasificación de los sistemas convectivos se refiere al estado natural de los yacimientos geotérmicos, sin embargo, a medida que se han ido descubriendo y desarrollando nuevos campos geotérmicos, se ha observado que un solo campo geotérmico puede tener tanto regiones de líquido como de vapor dominante.

III.2.2 Sistemas Geotérmicos Conductivos

Estos sistemas se caracterizan por tener un régimen térmico debido únicamente al proceso de transferencia de calor por conducción (Torres, et al., 1993). Dentro de esta categoría de sistemas destacan: a) los sistemas de roca seca caliente y b) los sistemas geopresionados.

a) Sistemas de roca seca caliente

Las masas rocosas y calientes pero secas, contienen una gran cantidad de calor, el cual no es fácil de extraer debido a su falta de porosidad natural y por ende de agua, la cual en circunstancias normales es la que funciona como fluido transmisor de calor. A esto se asocia el hecho de que tampoco existen cauces naturales a través de los cuales puedan circular esos fluidos (Reyes, 1987).

Debido a la baja conductividad térmica de las rocas, se requieren áreas muy grandes para la transferencia de calor si es que se desea obtener cantidades importantes de energía, lo cual no representa gran problema porque la cantidad de rocas secas y calientes dentro del subsuelo es muy grande, de hecho se ha calculado que la incidencia de este tipo de campos es de por lo menos 2 o 3 veces mayor que la de los sistemas hidrotermales. Sin embargo, uno de los problemas que se presentan para su explotación, es que estos sistemas se encuentran a grandes profundidades de la corteza terrestre, por lo que en muchos casos resulta incosteable su explotación comercial (Reyes, 1987).

En este tipo de sistemas el calor se obtiene de la siguiente manera: Se inyecta un fluido a presión para que fisure las rocas en la profundidad deseada. El agua circula en estas fracturas artificiales, extrayendo el calor de la roca circundante que actúa como un yacimiento natural. Este yacimiento es posteriormente alcanzado por un segundo pozo que se emplea para extraer el agua calentada; en el capítulo IV, se abunda un poco más sobre estos sistemas.

b) Sistemas geopresionados

Estos campos también son conocidos como sistemas de zonas de alta presión, se encuentran habitualmente en grandes cuencas sedimentarias, por ejemplo en el Golfo de México, a profundidades de 3 a 7 km. Los yacimientos geopresionados consisten en rocas sedimentarias permeables, intercalados en estratos impermeables; el agua sometida a presión permaneció entrampada desde el momento de la depositación de los sedimentos. La presión del agua caliente es cercana a la presión litostática, excediendo por mucho la presión hidrostática. Los yacimientos geopresionados también pueden contener cantidades significativas de metano y podrían producir energía térmica e hidráulica (aguas calientes presurizadas) como también gas metano. Estos

recursos han sido intensamente investigados pero aún, no han sido industrialmente explotados (Arellano, et al., 2008).

Además de los anteriores, también hay campos geotérmicos marinos y magmáticos.

III.2.3 Sistemas Marinos

Son sistemas de alta entalpía existentes en el fondo del mar, que en la actualidad no se explotan comercialmente y hasta ahora han sido poco estudiados, por ejemplo en el Golfo de California (México). Hace algunos años se efectuaron estudios preliminares en el Golfo de California, como parte de los estudios se incluyeron algunas inmersiones en un submarino, esto permitió observar a 2,600 metros de profundidad, impresionantes chimeneas naturales descargando chorros de agua a 350°C. El flujo de calor medido en algunos puntos del Golfo de California es muy alto, de 0.34 W/m², mientras que en promedio, el flujo natural de calor alcanza valores de entre 0.05 y 0.10 W/m². En el año de 1986, se efectuaron una serie de estudios en una zona del Golfo de California, denominada depresión de *Wagner* (latitudes de 31° 00' a 31° 15' y longitudes de 113° 50'), que cubre un área de 10 km de ancho por 20 km de largo. La investigación abarcó estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, a partir de los resultados del estudio se interpretó que la cuenca en estudio pudiera ser un campo geotérmico de gran magnitud, con un potencial energético de 100 a 500 veces mayor que el del campo geotérmico de Cerro Prieto (Arellano, et al., 2008).

III.2.4 Sistemas Mágmaticos

Son sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos o a gran profundidad, en zonas de debilidad cortical. En la actualidad no se explotan comercialmente; algunos ejemplos son: el volcán de Colima, México (Figura III.5), y el volcán Mauna Kea, Hawaii. Posiblemente el atractivo más importante de este tipo de recurso sean las altísimas temperaturas disponibles (800°C), ya que la eficiencia de las máquinas térmicas es proporcional a la temperatura máxima de su ciclo termodinámico.

En el mediano o largo plazo cuando se cuente con la tecnología y los materiales adecuados para resistir la corrosión y las altas temperaturas, se podrá explotar la enorme cantidad de energía almacenada en las cámaras magmáticas de los volcanes activos, aunque en muchos casos la gran profundidad a la que se encuentran también es un obstáculo importante (Arellano, et al., 2008).



Figura III.5 Volcán de Colima (Tomado de www.ucol.mx, 2009).

III.3 EXPLORACIÓN DE LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS

En su artículo, *¿Qué es la energía geotérmica?*, Dickson y Fanelli (2004), definen cada una de las etapas que se realizan en la exploración de los campos geotérmicos que se describe a continuación.

El principal propósito de la exploración de una zona geotérmica es definir su tamaño, forma y estructura así como determinar sus características, tales como: el tipo de fluido, su temperatura, composición química y su capacidad de producir energía.

Estas características pueden ser determinadas en dos formas: por exploración superficial y con perforaciones exploratorias. Puesto que es mucho más barato hacer exploración superficial que perforar pozos, se acostumbra realizar un extenso programa de exploración superficial antes de comenzar a hacer perforaciones (Dickson y Fanelli, 2004).

La exploración de un campo se puede dividir en dos etapas: reconocimiento y evaluación; y aún durante la etapa de explotación, se emplean algunos métodos de exploración con el objeto de llevar a cabo un monitoreo del campo. La planeación de cada una de las etapas en cuanto a su desarrollo y los métodos a usar, varían mucho dependiendo de las características del campo en estudio y del país en que se encuentre; sin embargo, se pueden definir los siguientes lineamientos generales:

- Comenzar con métodos simples y bien establecidos.
- Esforzarse desde el principio por obtener datos del prospecto en su totalidad.
- Usar tanto como sea posible los recursos locales disponibles.

Antes de realizar un programa de exploración geotérmica, todos los datos geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y geoquímicos existentes deben ser recolectados e integrados con todos los estudios previos disponibles sobre

agua, recursos minerales o petróleo que se hayan efectuado en el área del proyecto y en las zonas adyacentes. Esta información juega un papel importante en la definición de los objetivos que se plantean en el programa de exploración geotérmica y pueden conducir a una reducción importante en los costos (Dickson y Fanelli, 2004).

El programa de exploración es usualmente desarrollado básicamente paso por paso: reconocimiento, pre-factibilidad y factibilidad. Durante cada fase del proyecto se van eliminando gradualmente las áreas de menor interés y concentrándose en las más prometedoras.

Los métodos también pueden ser progresivamente más sofisticados y más detallados conforme el desarrollo del programa avance (Dickson y Fanelli, 2004).

El tamaño y presupuesto del programa entero debe ser proporcional a los objetivos, a la importancia de los recursos que se espera encontrar y a la planeación de la utilización que se harán de los mismos (Dickson y Fanelli, 2004).

El programa establecido debe ser flexible y reexaminado conforme se vayan obteniendo los diferentes datos y se realicen los estudios de cada fase; similarmente, el modelo geológico-geotérmico debe ser progresivamente actualizado y mejorado. Ese reajuste periódico del programa debe eliminar idealmente algunas operaciones que no son del todo necesarias e insertar otras, de acuerdo al resultado obtenido en cada estadio de desarrollo.

Evidentemente, una reducción en el número y tamaño de las prospecciones, disminuye los costos y también corresponde a un incremento en el riesgo de error en el futuro. A la inversa, por el decremento en el riesgo de error, aumentan los costos. El éxito económico de un programa de exploración geotérmica depende de encontrar el balance apropiado entre los dos.

Los principales objetivos a cumplirse durante la exploración geotérmica son los siguientes (Dickson y Fanelli, 2004):

1. Identificar los fenómenos geotermiales.
2. Determinar la viabilidad de la producción de un campo geotérmico.
3. Estimación del tamaño del campo geotérmico.
4. Determinar la porosidad efectiva de la roca almacenadora.

5. Determinar el tipo de yacimiento geotérmico.
6. Localizar las zonas productivas.
7. Determinar la cantidad de calor contenido en los fluidos y la posibilidad de su aprovechamiento.
8. Determinar el volumen de agua disponible de acuerdo a los balances hídricos.
9. La compilación de un cuerpo de datos que puedan ser confirmados o no con los obtenidos en la realidad.
10. Determinar los valores de los parámetros de pre explotación que sean sensibles al medio ambiente.
11. Tener conocimiento de algunas características que pudiesen ocasionar problemas durante la explotación del recurso.

La importancia relativa de cada objetivo y el orden depende de numerosos factores, la mayoría de los cuales están ligados al recurso mismo. En cada proyecto, se considera la utilización anticipada de la tecnología disponible, la economía, la situación del campo, su localización y el tiempo (Dickson y Fanelli, 2004).

Por ejemplo, un reconocimiento preliminar de una zona con manifestaciones hidrotermales tiene mayor importancia que un área inexplorada o de la cual se sabe muy poco y por lo tanto, el orden y tipo de objetivos varían de un caso a otro.

Un gran número de tecnologías y métodos pueden ser obtenidos en el orden en que se requiera de acuerdo a los objetivos. Muchos de esos métodos son usados actualmente en otros sectores en la búsqueda de otros recursos naturales.

Por ejemplo, las técnicas usadas en la exploración de minerales, gas o petróleo, podrían ser usadas en la búsqueda de calor, sin embargo, dependiendo del proyecto, no necesariamente debe ser así, ya que hay casos en los que bastan algunas de las más sencillas herramientas de las usadas en la búsqueda del calor interno de la Tierra que pueden resultar ideales (Dickson y Fanelli, 2004).

A continuación, se mencionan las funciones específicas que tiene cada uno de los métodos que se emplean en exploración geotérmica.

III.3.1 MÉTODOS GEOLÓGICOS

Los métodos geológicos son el punto de partida en un programa de exploración, tienen una función básica que es la de identificar la localización y extensión de las áreas importantes; son un elemento primordial en todas las fases subsecuentes de la exploración y explotación. Estos estudios permiten establecer el sitio correcto donde se van a perforar los pozos exploratorios y productores (de desarrollo).

También proveen información para la interpretación de los datos obtenidos con otros métodos de exploración y, finalmente para construir un modelo realista del sistema geotérmico y para evaluar el potencial del recurso (Dickson y Fanelli, 2004).

Los estudios geológicos e hidrológicos pueden ser usados en la fase de producción, proporcionando información valiosa del yacimiento.

Los principales objetivos de los estudios geológicos en la etapa de reconocimiento son: identificar y catalogar todas las manifestaciones geotérmicas que existan en la superficie, ya sean activas o fósiles; efectuar una evaluación preliminar de su significado con respecto a los procesos subterráneos que tienen lugar en el sistema geotérmico; y recomendar las áreas para un estudio a mayor detalle. Esto se lleva a cabo examinando fotografías aéreas o imágenes de satélite y visitando el área para correlacionar los datos de éstas con la información disponible (Dickson y Fanelli, 2004).

Una vez terminado el reconocimiento del área, si se identifica que la zona geotérmica tiene posibilidades para su explotación, se continúa con la etapa de exploración propiamente dicha, en la cual se debe preparar un mapa geológico a detalle del prospecto geotérmico seleccionado y de las áreas circundantes.

Este mapa debe incluir a las unidades estratigráficas, los rasgos estructurales, las manifestaciones superficiales (sección geológica), la profundidad a la que se encuentran los diferentes tipos de rocas, su porosidad, permeabilidad, etc. Todos estos elementos pueden contribuir a elaborar un modelo del sistema geotérmico y recomendar la localización de los pozos exploratorios (Dickson y Fanelli, 2004).

El método de cartografiado de las alteraciones hidrotermales de las rocas es empleado en provincias volcánicas jóvenes en donde hay actividad volcánica que se manifiesta mediante aguas termales, vapor o fumarolas, lo que es indicio de una secuencia de rocas o cámara magmática todavía calientes. Los puntos visibles en la superficie de la salida de vapor, de agua o de los gases, son efímeros. Cuando existen zonas debilidad, por ejemplo, relacionadas con el tectonismo, se forman nuevas fracturas y por precipitación química de minerales otras se cierran. El antiguo camino de ascenso queda marcado, de tal manera que en el transcurso del enfriamiento de una cámara magmática, los cortes geológicos cartografiables en superficie, exponen las alteraciones

hidrotermales de las rocas. Muy frecuentemente se ven cubiertas por la vegetación y por lo tanto, no son visibles en toda su extensión (Buntebarth, 1994).

Después de elaborar el mapa de alteraciones hidrotermales, se realiza la clasificación temporal de las anomalías térmicas en el contexto de la historia geológica; para esto se determina la edad de los depósitos hidrotermales.

Además otras determinaciones relativas de edades de las anomalías geotérmicas se obtienen mediante una correlación con los sedimentos o rocas que existen fuera de la zona de alteración; por ejemplo, si un conglomerado contiene fragmentos alterados por la corrosión del agua termal, entonces es más joven que la anomalía, y la edad de la roca corroída por el agua termal proporciona un límite superior a la edad del yacimiento geotérmico (Buntebarth, 1994).

A partir de la duración de la actividad hidrotermal y del volumen de roca alterada, se puede evaluar a grosso modo la magnitud, en profundidad, de la fuente termal.

En la Tabla III.I, se muestra una relación en la que se establece el tipo de estudio geológico y la información que se obtiene del mismo, cabe mencionar que los estudios a realizar dependerán de cada proyecto en específico de acuerdo a sus características individuales.

TIPO DE ESTUDIO	INFORMACIÓN OBTENIDA
Geomorfología	Dinámica Superficial
Fotogeología	Geología Preliminar
Cartografía De Campo	Mapa Geológico
Petrografía	Litología Superficial Y Subsuelo
Geocronología	Relaciones De Tiempo
Vulcanología	Procesos Volcánicos
Geología Estructural	Mapa Estructural
Modelo Geovulcanológico	Magmagénesis
Modelo Tectónico	Contexto Global
Estudios Aéreos En Infrarrojo	Anomalías Térmicas
Imágenes Satelitales	Mapas Estructurales Y Texturales
Estudio De Bandas Termal	Anomalías Termal
Mapeo Temático	Mapa Temático

Tabla III.I Tipo de estudio geológico y la información que se obtiene del mismo en un proyecto de exploración geotérmica (Tomada de Torres, et al., 1993).

III.3.2 MÉTODOS HIDROGEOLOGÍCOS

Los métodos hidrológicos junto con los geológicos, constituyen la base en la exploración geotérmica. El agua es de vital importancia, y el estudio de las aguas del subsuelo, es considerado como una ciencia cuantitativa y cualitativa que tiene como objetivo fundamental determinar entre otras cosas, su localización, cantidad, dirección de flujo; así como, las características de las rocas y suelos localizados en las diferentes unidades de permeabilidad. Esta información permite establecer los criterios necesarios para determinar la extensión y distribución del yacimiento geotérmico (Dickson y Fanelli, 2004).

La evaluación detallada de los recursos hidrológicos e hidrogeológicos es de gran importancia para evaluar el potencial de la energía geotérmica, aunque no siempre son tomados en cuenta, por ello, se deben realizar consideraciones especiales con las manifestaciones geotérmicas detectadas en sondeos, ya que su análisis resulta fundamental.

En hidrogeología, también existen diversos tipos de estudios que tienen como objetivo la descripción textural de las características y propiedades relacionadas con la presencia de agua subterránea, así como de su comportamiento, características hidráulicas, control y afectación por la presencia de diversos elementos químicos. La Tabla III.2 resume los principales tipos de estudios hidrogeológicos y la información que proporcionan para los fines de exploración (Torres, et al., 1993).

TIPO DE ESTUDIO	INFORMACIÓN OBTENIDA
Climatología	Volúmenes de Agua de Origen Meteórico
Hidrología De Campo	Hidrodinámica de Acuíferos
Hidrología Superficial	Volúmenes de Esguerrimiento
Hidrogeología	Caracterización de Acuíferos, Recarga de Sistemas Geotérmicos
Hidrogeoquímica	Caracterización de Acuíferos y Procesos de Termalismo
Isotopía & ¹⁸O	Origen de Fluidos y Mezcla
Trazadores	Trayectoria de Flujo, Propiedades Hidrodinámicas
Modelación Numérica	Simulación predictiva del acuífero

Tabla III.2 Tipos de estudios hidrogeológicos y la información que se obtiene de los mismos en proyectos con fines de exploración geotérmica (Tomada de Torres, et al. 1993).

III.3.3 MÉTODOS GEOQUÍMICOS

Incluyendo la geoquímica isotópica, estos estudios se utilizan como medidas para determinar si el sistema geotérmico es predominantemente agua o vapor; también es posible obtener la estimación de la mínima temperatura esperada a cierta profundidad, la estimación de la homogeneidad del agua suministrada, se pueden inferir las características químicas de un fluido a determinada

profundidad y la capacidad de recarga. Esta información valiosa, también puede obtenerse durante la reinyección y utilización de plantas, ya que permite conocer información sobre la composición de los fluidos y del probable impacto ambiental que pueden ejercer (Dickson y Fanelli, 2004).

Un examen químico o análisis isotópico se hace a las muestras de agua y gas que provienen de manifestaciones geotermales como fumarolas o bien, de pozos exploratorios. El análisis químico de las aguas termales proporciona su composición química que provee mucha información sobre el origen de las mismas, así como sobre la temperatura que reina en el yacimiento. Se puede conocer el camino de migración, y finalmente caracterizar el sistema hidrotermal en su totalidad, describiendo la participación de aguas magmáticas y meteóricas, así como del agua fósil en los poros de las rocas sedimentarias. La explicación del proceso de mezcla proporciona indicaciones de gran valor para la utilización efectiva del yacimiento geotérmico. Cuando el agua proviene de un yacimiento cerrado, se puede evaluar su capacidad de almacenamiento. En un sistema geotérmico, donde el agua meteórica penetra muy profundamente, para ahí ser calentada y alcanzar de nuevo la superficie, se debe evaluar la productividad para que este sistema no limitado con respecto al tiempo, no se vea perjudicado por la explotación. Se puede lograr una diferenciación entre ambos sistemas, mediante el análisis químico de los fluidos térmicos, ya que los efectos de la temperatura en el subsuelo son semejantes en ambos casos (Buntebarth, 1994).

Además de determinar la estructura del sistema hidrotermal, el contenido de SiO_2 puede proporcionar información, ya sea sobre la temperatura del yacimiento geotérmico, o bien información cuantitativa sobre la mezcla de aguas termales y de aquellas provenientes de la superficie.

Las anomalías no están siempre caracterizadas por una actividad hidrotermal alta. A falta de fumarolas o de zonas de alteración hidrotermal, el contenido de radón del suelo y de óxido de carbono, así como de elementos volátiles tales como el mercurio, arsénico y boro, constituyen guías en la exploración geoquímica de regiones calientes del subsuelo. La distribución en la corteza de los elementos y compuestos mencionados, es igualmente apropiada para la cartografía de zonas de fracturamiento, y para ayudar a fijar los límites de una fuente profunda de calor (Buntebarth, 1994).

El gas noble radón, con una vida media de 3.8 días, es un elemento con una vida corta (Rn^{222}), el cual se origina de la desintegración del radio (Ra^{226}) y en general está regularmente distribuido en la corteza superior. En fracturas, asciende el radón y por lo tanto puede servir a la prospección de zonas de fracturamiento; el cartografiado del contenido de este elemento en el suelo proporciona información muy valiosa en la exploración (Buntebarth, 1994).

La concentración de radón proporciona información muy importante a sobre las propiedades de transmisibilidad de las rocas, tales como la permeabilidad y la velocidad del flujo de los fluidos que llenan los poros de las rocas en el yacimiento geotérmico.

Por otro lado, la transformación en carbón de las sustancias orgánicas incluidas en las rocas sedimentarias, es decir, el incremento en su grado de carbonización, ocurre bajo la influencia de una temperatura de reacción y del tiempo. La evolución de la transformación en carbón en el seno de una anomalía de calor, es por lo tanto apropiada para caracterizar la anomalía misma, a partir de los efectos integrados de la temperatura y del tiempo. Sin embargo la obtención de información cuantitativa es posible sólo excepcionalmente debido a los cortos tiempos de influencia (Buntebarth, 1994).

Las condiciones geotérmicas regionales han logrado, a las profundidades respectivas, que ocurra un determinado grado de carbonización, el cual se vería perturbado por el ascenso de fluidos hidrotermales y/o el ascenso de magma hasta horizontes más someros de la corteza terrestre. Dentro de una anomalía geotérmica, el grado de carbonización aumenta más con la profundidad, que por fuera de ella. Después de períodos prolongados de influencia, el gradiente de transformación en carbono puede relacionarse a un gradiente de temperatura. Pero en el caso de períodos cortos de calentamiento, esto no es posible sin cálculos suplementarios de modelado geotérmico, ya que no se puede alcanzar durante la evolución del proceso de enfriamiento de un cuerpo intrusivo un grado de carbonización similar al que sería alcanzado bajo las temperaturas de reacción comparables, pero bajo un régimen estacionario. Sin embargo, en el caso de gradientes de carbonización homogéneos elevados, se puede obtener información sobre la posible existencia de una anomalía de calor de origen conductivo (Buntebarth, 1994).

La transformación de las sustancias orgánicas ocasionadas por el aumento en la temperatura también puede ser estudiada mediante el análisis de uno de sus productos de reacción, los hidrocarburos, y así delimitar la posición de la región de mayor temperatura gracias a la concentración de este último.

Los estudios geoquímicos proveen datos para la planeación de la exploración y el costo es relativamente bajo comparado con otros métodos que utilizan tecnología sofisticada como los geofísicos. Las técnicas de geoquímica deben ser utilizadas tanto como sea posible antes de proceder con metodologías más costosas (Dickson y Fanelli, 2004).

III.3.4 MÉTODOS GEOFÍSICOS

Los métodos geofísicos de prospección deben ser apropiados para localizar desde la superficie yacimientos geotérmicos situados en profundidad. En los métodos directos se mide la temperatura del suelo, ya sea desde el aire,

mediante el registro de observaciones infrarrojas, o en la misma superficie con ayuda de termómetros. En el contexto de la medición de temperaturas del subsuelo a diferentes profundidades, también se puede incluir el flujo de calor, variable física que está mejor adaptado para evaluar la magnitud de una fuente térmica. En los métodos indirectos se utiliza la sensibilidad a la temperatura de las variables físicas de las rocas para estimar cuantitativamente la temperatura y se aplican métodos cualitativos que proporcionan indicios sobre yacimientos geotérmicos, tal como una alta sismicidad o un elevado potencial eléctrico en la superficie (Buntebarth, 1994).

III.3.4.1 Mediciones infrarrojas

El dominio del infrarrojo-térmico comprende longitudes de onda que se encuentran entre 3 y 14 μm . Este dominio incluye dos ventanas atmosféricas que se encuentran entre 3 y 5 μm , o bien entre 8 y 14 μm . Las ondas infrarrojas más largas son absorbidas en la atmósfera.

La radiación en el dominio infrarrojo indicado no puede ser estudiada con cámaras fotográficas usuales, ya que las lentes son impermeables al dominio térmico infrarrojo; sin embargo existen termocámaras infrarrojas especiales que permiten identificar anomalías con gran precisión. La radiación infrarroja es medida, en la mayoría de los casos, con ayuda de detectores basados en semiconductores. En las mediciones superficiales se usan radiómetros, los cuales miden la temperatura del orden de 0.2°C. Desde aviones o bien desde satélites se usan sistemas de barrido que constituyen métodos de representación de imágenes que proporcionan una mayor sensibilidad a la temperatura (Buntebarth, 1994).

Las temperaturas de radiación que así se observan, no dependen únicamente de la radiación solar, sino que también dependen de la topografía y de las propiedades térmicas de la superficie. Aquí, además de la conductividad y de la temperatura del cuerpo, la fuente de calor juega un papel muy importante. El contraste de temperatura, está relacionado a diferentes propiedades térmicas del suelo; es máximo en la noche poco antes de la salida del sol, y también en el día aproximadamente una hora inmediatamente después del máximo de temperatura de medio día.

Para poder reconocer una anomalía de temperatura con base a estudios infrarrojos, el flujo anómalo de calor proveniente del subsuelo debe ser aproximadamente 100 veces mayor que el valor normal del flujo de calor, lo cual únicamente sucede en anomalías muy marcadas, generalmente de origen volcánico. Desde aviones o satélites los métodos altos infrarrojos son idóneos para el reconocimiento de fuentes de calor tanto en la superficie terrestre como en el agua. Para anomalías muy grandes que alcanzan valores, varios miles de veces más grande que el flujo térmico normal, existe una ecuación empírica, a través de la cual se puede calcular el flujo de calor con base en la temperatura

superficial. Por lo general, con ayuda de mediciones superficiales de temperatura hechas con termómetros, se puede localizar con mayor exactitud y más rápidamente una fuente de calor natural (Buntebarth, 1994).

III.3.4.2 Mediciones superficiales de temperatura y flujo de calor

Cuando la medición superficial de temperatura es empleada como método de prospección, es posible realizar la evaluación de la magnitud de una fuente de calor a partir de la distribución de temperatura a dos profundidades próximas a la superficie, además de que el campo de temperaturas indica dónde se deben perforar los pozos, siempre y cuando se tengan buenas posibilidades de que exista agua caliente o vapor.

Las observaciones bidimensionales de temperaturas deben, por un lado, ser independientes de las variaciones diarias de la temperatura, es decir, la profundidad de observación debe ser mayor a $z = 0.5\text{m}$ y por otro, las observaciones se deben realizar rápidamente. Para poder evaluar las dimensiones y la productividad del yacimiento a menudo se miden las temperaturas a las profundidades de $z = 1\text{ m}$ y $z = 10\text{ m}$. Ya que las variaciones anuales de la temperatura superficial están incluidas en los valores observados; la prospección deberá efectuarse en un periodo corto de tiempo, ya que entonces las variaciones del campo de temperaturas con periodos muy largos serán insignificantes durante el tiempo de medición (Buntebarth, 1994).

Como termómetro se utilizan sensores eléctricos tales como el termómetro de resistencias, los termistores y los termoelementos. Con la exactitud de $+0.1^\circ\text{C}$, proporcionada, por lo general por estos instrumentos y con una diferencia de profundidad de 10 m , se puede identificar un gradiente medio de temperatura de 30°C/Km aproximadamente cuando se aplica la corrección de la variación anual de la temperatura. Un yacimiento geotérmico somero aprovechable desde el punto de vista económico, se manifiesta mediante un gradiente de temperatura de 0.1°C/m de tal manera, que, en primer lugar, para localizar una anomalía geotérmica las observaciones deben efectuarse en dos niveles con una diferencia de profundidad de 10 m aproximadamente. En este caso es posible realizar una estimación aproximada de la magnitud de la fuente de calor. Únicamente con pozos más profundos, hasta 30 m aproximadamente, es posible realizar un cálculo cuantitativo seguro, ya que las variaciones anuales de la temperatura superficial son casi nulas a esa profundidad.

La temperatura superficial delimita con claridad las zonas de transporte convectivo de calor dentro de áreas con potencial geotérmico. De esta forma, en la anomalía se pueden delimitar zonas de fracturamiento, las cuales ayudan a determinar la ubicación de los pozos (Buntebarth, 1994).

El flujo de calor contiene dos componentes, una parte conductiva y otra convectiva. Asociado a la porción convectiva se deben considerar las

eventuales fuentes de aguas termales o de vapor existentes, ya que la cantidad de calor conducida por estos fluidos no es cedida completamente a la roca vecina a lo largo del camino de ascenso. El cálculo de la pérdida de calor proporciona información para determinar si la anomalía representa un yacimiento perecedero desde el punto de vista económico o si el rendimiento es suficiente para una utilización continua, temporalmente ilimitada.

En la Figura III.7 se muestra un mapa infrarrojo de las temperaturas de la superficie del mar, apareciendo en rojo las más calientes y en morado las más frías. Las regiones alrededor del ecuador, a 0° de latitud, son calentadas por el sol más que las zonas del resto del globo. Estas áreas calientes están indicadas en colores rojo, naranja y amarillo, de tal manera que las zonas de mayor temperatura son visibles a simple vista.

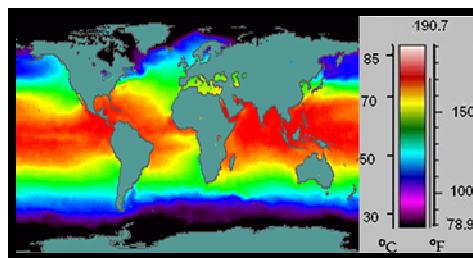


Figura III.7 Imagen de rayos infrarrojos de la superficie del mar (Modificada de www.spitzer.edu, 2007).

III.3.4.3 Mediciones gravimétricas

Los resultados obtenidos con los métodos gravimétricos sirven para delimitar las estructuras geológicas del subsuelo, las cuales constituyen una herramienta importante para localizar el máximo en la anomalía de calor, así como indicar con mayor certeza la ubicación de los pozos (Quijano, 2007).

La prospección gravimétrica se fundamenta en la observación experimental de la intensidad del campo gravitacional de la superficie terrestre, ya que presenta variaciones pequeñas, que pueden ser detectadas con instrumentos de precisión. Estas 'anomalías' gravimétricas se originan por variaciones en la masa de la corteza terrestre, debidas a rasgos litológicos y estructurales. La intensidad promedio del campo gravitacional (en su componente vertical) de la Tierra está dada por la expresión (Quijano, 2007):

$$g = G \cdot (M_t / R_t^2);$$

Donde G es la constante de gravitación, M_t la masa de la Tierra y R_t , su radio. A nivel del mar, en el ecuador, tiene un valor de $9,780326771 \text{ m/s}^2$, según el World Geodetic System 1984 (WGS-84).

Para contar con una referencia universal con la cual comparar las mediciones de campo, es necesario definir una superficie equipotencial del campo gravitacional. Esta superficie se conoce como geoide, y coincide, en cierta manera, con la superficie de los océanos y su prolongación virtual en los continentes. En el cálculo del geoide se considera, por una parte, el hecho de que la Tierra no es una esfera perfecta, sino un esferoide o elipsoide achatado por los polos; por otra parte, se toma en cuenta la fuerza centrífuga debida a la rotación. Esta fuerza depende de la latitud y actúa en sentido contrario a la fuerza gravitacional. El geoide de referencia aceptado oficialmente en México es el WGS-84, que incluye los parámetros que definen la forma del elipsoide, la velocidad angular, la masa del elipsoide y un modelo gravimétrico detallado. El marco de referencia WGS-84 es consistente con el International Terrestrial Reference Frame 1992 (ITRF-92), que se usa en los levantamientos topográficos (Quijano, 2007).

Los datos de campo, para poder ser interpretados, deben corregirse de tal manera que los valores de gravedad tengan una referencia normalizada. De otra forma, alguno o varios de estos efectos pueden ser dominantes e impedir que las anomalías puedan ser observadas; estas correcciones son:

- Altitud
- Latitud
- Efecto Bouguer
- Efecto topográfico
- Mareas

Una vez realizadas todas estas correcciones, se obtiene el mapa de anomalía de Bouguer, que refleja las variaciones de densidad del subsuelo y que servirá de base para el modelado numérico y para realizar la interpretación correspondiente.

Como última etapa, se realiza el modelado numérico de la anomalía de interés, que consiste en proponer la geometría y localización del cuerpo geológico causante de la anomalía residual. Este puede realizarse con técnicas directas o inversas. Con la actual disponibilidad de equipo de cómputo y de algoritmos apropiados, las técnicas de inversión se han vuelto más accesibles.

Las grandes anomalías geotérmicas se localizan en regiones volcánicas activas, de tal forma que los reservorios de agua caliente o bien de vapor se encuentran en la mayoría de los casos asociados a estratos porosos, los cuales presentan una alta porosidad en relación con las formaciones fuera del yacimiento; a causa de ésta su densidad disminuye y se presentan como anomalías gravimétricas negativas muy locales. Además, las fracturas también tienen alta porosidad y dan origen a anomalías negativas muy locales, las cuales por un lado, delimitan el camino de ascenso de los fluidos hidrotermales y por el otro, posibilitan una cartografía de las zonas de fracturamiento. A partir

del sistema de zonas de fracturamiento se pueden evaluar los tamaños de las diversas partes del yacimiento (Quijano, 2007).

A menudo, además de la prospección indirecta, también es posible una evaluación cuantitativa de la temperatura, la cual se basa en la disminución de la densidad debido a la temperatura. La temperatura en el yacimiento es una variable muy importante, que habla a favor o en contra de la factibilidad del aprovechamiento de la energía.

III.3.4.4 Mediciones geoelectricas

La distribución de la resistencia eléctrica específica en el subsuelo es usada con éxito desde hace mucho tiempo en la prospección de aguas subterráneas.

La geoelectricidad puede también ser empleada en la prospección de yacimientos geotérmicos, junto con otros métodos que se usan en campos eléctricos artificiales; también se puede aplicar para realizar la medición de autopotenciales geoelectricos de campos eléctricos naturales (Buntebarth, 1994).

Los métodos geoelectricos se pueden emplear en estratos conductores ya sea como sondeos o bien en el cartografiado de las variaciones laterales. Por lo general, los estratos con bajas resistencias específicas pueden ser asociados a los yacimientos buscados de agua caliente. Una disminución brusca de la resistencia específica es un indicativo de un acuífero.

La resistencia específica se ve determinada por la porosidad, el contenido en sales del agua y también por la temperatura.

En el contexto de los campos eléctricos naturales, se utiliza el potencial natural, el cual se origina por la migración de un electrolito a través de un estrato permeable. Este potencial electrocinético es considerablemente mayor que el potencial termoelectrico que se presenta en las anomalías geotérmicas. Frecuentemente dentro de una anomalía geotérmica existe un sistema hidrotermal pronunciado, a menudo el método de potencial natural es idóneo para la prospección de yacimientos geotérmicos. El cálculo del potencial de electrofiltración apenas es posible debido a los múltiples parámetros que deben considerarse, tales como la diferencia de presión, la viscosidad y la resistencia específica. Por lo general la diferencia de potencial aumenta con la resistencia específica del fluido de poro. El signo de la caída de potencial es por lo general negativo en aguas descendentes y positivo en aguas ascendentes (Buntebarth, 1994).

El efecto termoelectrico entra en acción tan pronto como se presenta una diferencia de temperatura. La caída de potencial que se origina es proporcional a la diferencia de temperatura.

Los autopotenciales se ven perturbados por muchos efectos secundarios, tales como las corrientes telúricas de grandes períodos, corrientes de potencial de origen topográfico, por efectos electroquímicos y otros. Una interpretación cuantitativa de las mediciones, se realiza a partir de una determinación del campo de temperaturas o de la evaluación de la cantidad de agua termal ascendente (Buntebarth, 1994).

En la Figura III.8 se muestra el resultado de un estudio geoelectrico del campo geotérmico de Cerritos Colorados que se localiza dentro del Bosque de La Primavera, a 20 km al oeste de Guadalajara, Estado de Jalisco, México. El objetivo fue identificar la zona de resistividad mínima y estructuras que permitieran definir el movimiento de los fluidos geotérmicos. El resultado es ambiguo a profundidad porque las curvas de resistividad aparente no parecen alcanzar los valores mínimos, incluso con el máximo espaciamiento de los electrodos, por lo que se considera confiable sólo la estructura resistiva a profundidades relativamente someras (menos de 750 metros bajo el nivel del mar). La distribución de la resistividad inversa a una profundidad relativamente somera muestra una importante zona de baja resistividad que probablemente refleja la zona de alteración hidrotermal en la porción central del área de estudio, donde se localizan algunos pozos productores. Esta zona de baja resistividad se ubica en la parte occidental de una discontinuidad resistiva de orientación NW-SE, la cual se detecta también con la distribución de la resistividad inversa. Por lo tanto, la discontinuidad resistiva NW-SE indica probablemente una estructura tipo falla que controla el movimiento de los fluidos geotérmicos (Molina, et al., 2006).

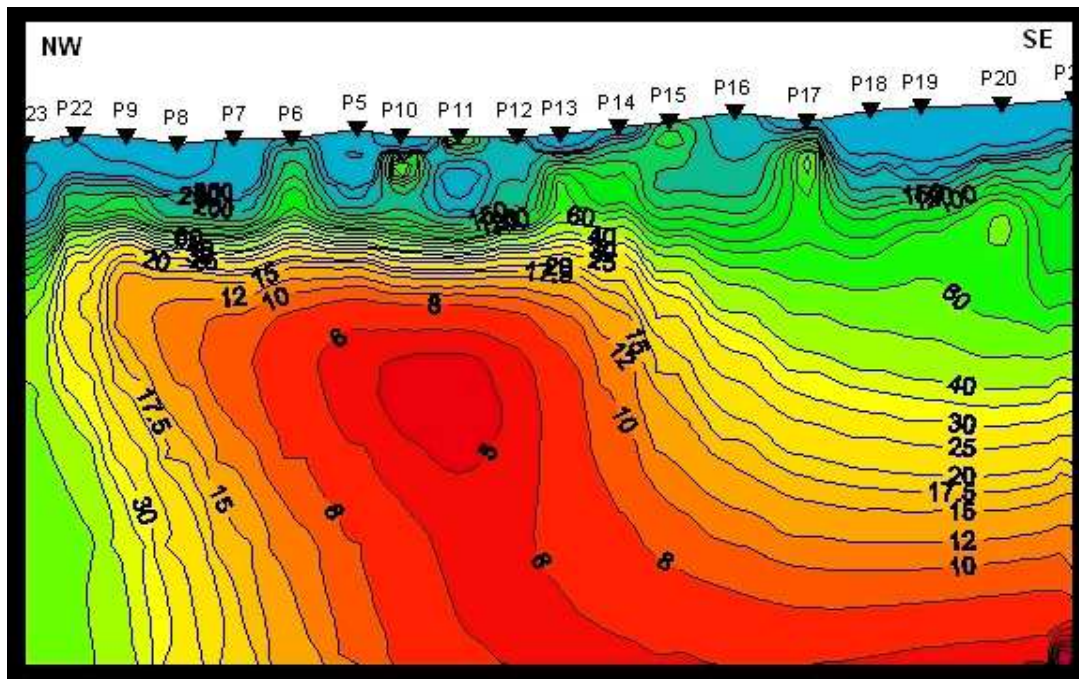


Figura III.8 Resultados del estudio geoelectrico en Cerritos Colorados, Jalisco (Tomada de Molina, et al., 2006).

III.3.4.5 Métodos sísmicos

La prospección sísmológica se divide en dos grandes grupos. Primero, la llamada sísmica de reflexión que se utiliza como herramienta básica en la prospección petrolera y que consiste en provocar artificialmente ondas sísmicas en el subsuelo, mediante explosivos o vibradores. Al medir y registrar la componente reflejada de estas ondas, se puede obtener información valiosa de la estructura del subsuelo (Buntebarth, 1994).

En geotermia, este tipo de prospección se ha usado poco, por su alto costo y porque en ambientes volcánicos no existen horizontes reflectores bien definidos.

El tipo de prospección útil en geotermia es el registro de la microsismicidad natural del terreno.

La actividad sísmica se registra mediante sismómetros y sismógrafos. Los equipos digitales de tres componentes (x,y,z) son los más adecuados para estudios exploratorios; los sensores pueden medir la velocidad del movimiento del terreno o la aceleración. Estos últimos son mejores pues pueden registrar sismos en un rango grande de magnitudes sin que se saturen (Buntebarth, 1994).

Hasta ahora la aplicación de la sísmología de reflexión y de refracción a la prospección de recursos geotérmicos ha tenido lugar en muy pocas regiones. Se ha demostrado que los tiempos residuales de las ondas compresionales son negativos, cuando las ondas atraviesan una anomalía geotérmica. En las regiones estudiadas, el retraso en el tiempo de recorrido es de 0.2 segundos aproximadamente y es atribuido a las dos propiedades características de un sistema hidrotermal: la alta porosidad y las elevadas temperaturas. Además de la disminución de la velocidad de las ondas compresionales en su paso por una anomalía geotérmica, también la amplitud y el frente de onda se ven modificadas; el coeficiente de absorción es ahí muy grande (Buntebarth, 1994).

La aplicación de la sísmica de reflexión y de refracción es más apropiada para la localización de yacimientos geotérmicos profundos que en la prospección de yacimientos próximos a la superficie, los cuales son estudiados óptimamente por otros métodos geofísicos.

El vapor o el agua que emanan de una anomalía geotérmica da origen a lo largo de su camino de ascenso a elevados gradientes locales de temperatura, los cuales ocasionan fracturas en las rocas, y alivios instantáneos de presión, dando origen a explosiones locales de vapor a partir del agua sobrecalentada.

Tales fenómenos locales se caracterizan en el seno de una anomalía geotérmica por una alta sismicidad (Buntebarth, 1994).

Es por lo tanto posible localizar yacimientos calientes con temperaturas muy por arriba de $T = 100^{\circ} \text{C}$, donde el punto de ebullición del agua se encuentra a presión normal.

Un ejemplo del uso de métodos sísmicos, es en el que Lermo, et al. (2008), analizaron la distribución en superficie y en profundidad de los sismos ocurridos en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla (México), durante el periodo 1997-2004. Los datos corresponden a 95 sismos registrados por más de cinco estaciones permanentes y temporales instaladas por la Comisión Federal de Electricidad y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyas magnitudes de duración fueron menores o iguales a 3.6 Md y a profundidades focales que no sobrepasan los 4.0 km (Figura III.9).

Asimismo, se realizaron mecanismos focales simples y de inversión de tensor de momento, y se comparó el número de sismos registrados por dos estaciones de la red permanente (números S05, S06) con la inyección de agua y la producción de vapor durante cierto tiempo.

Los resultados en superficie y en profundidad muestran actividad sísmica en la zona norte del campo, alrededor de los pozos inyectoros I29 (pozo H-29) e I38 (pozo H-38) (Figura III.9), mientras que los mecanismos focales simples y de tensor de momento evidencian esfuerzos de origen heterogéneo, sugiriendo que parte de la actividad sísmica ocurrida en Los Humeros puede haber sido "inducida" principalmente por el proceso de inyección de agua al subsuelo del campo geotérmico

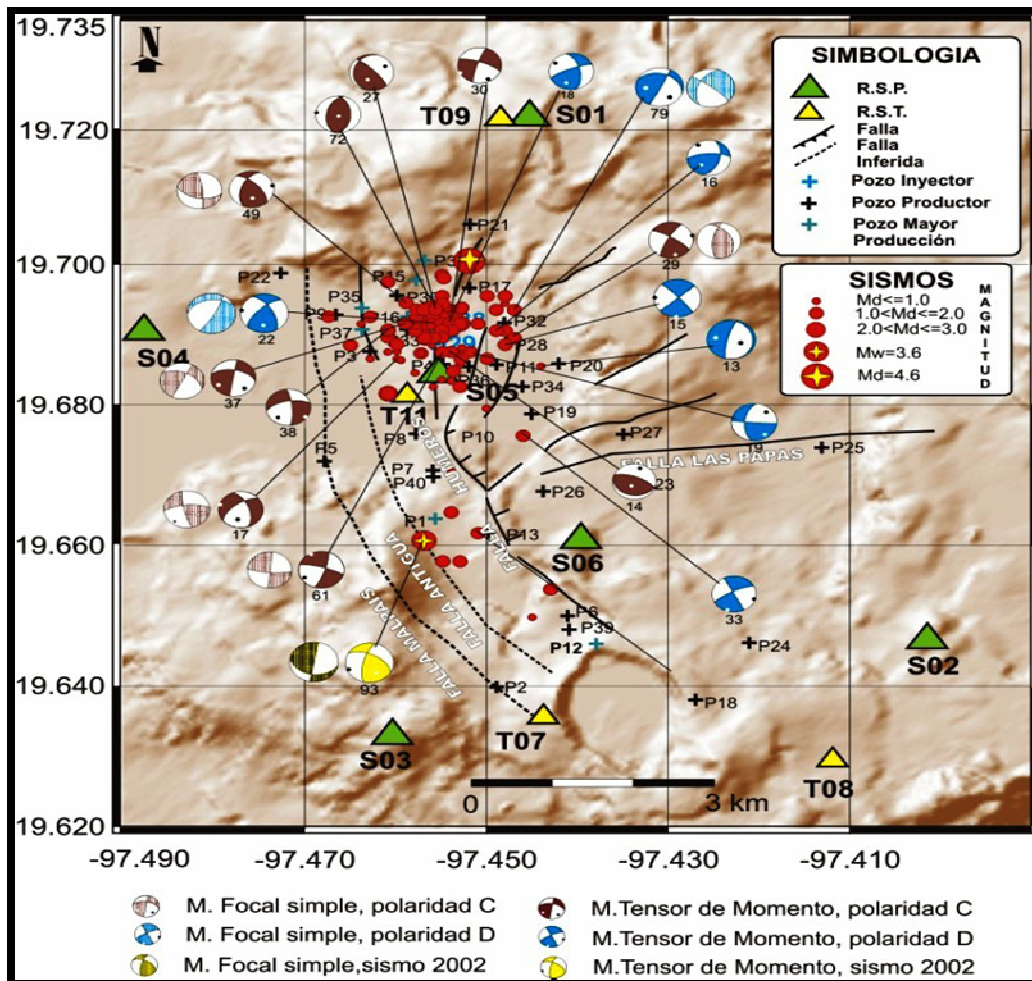


Figura III.9 Distribución de los sismos seleccionados, mecanismos focales simples y de tensor de momento con polaridad compresional y dilatacional (Tomada de Lermo, et al., 2008).

La importancia del monitoreo sísmico en el campo de Los Hornos se deriva básicamente del sismo del 25 noviembre de 1994, el cual ocasionó daños considerables en su infraestructura, por ello, en diciembre de 1997 la CFE instaló una Red Sísmica Telemétrica Permanente, a fin de analizar la distribución de la sismicidad, conocer los mecanismos que la generan, el estado de esfuerzos del campo geotérmico y la relación de los sismos registrados en las estaciones permanentes (S05, S06) con los pozos (inyectores, productores) y la tectónica local (Lermo, et al., 2008).

III.3.4.6 Métodos magnetométricos

La Tierra posee un campo magnético estacionario, que en la superficie terrestre puede ser representado, con buena aproximación, por un campo magnético bipolar. Este campo se produce por varias fuentes, la más importante es el llamado 'geodynamo magnético', que se origina por la convección de minerales líquidos eléctricamente conductivos, en la porción

externa del núcleo terrestre. Otras fuentes son la magnetización de la corteza terrestre y varias fuentes exteriores como la ionósfera (Quijano, 2007).

La contribución de la corteza es importante en el contexto de la exploración de recursos naturales como la energía geotérmica. Esta contribución debe a la presencia de concentraciones anómalas de minerales magnéticos, como la magnetita, y puede ser inducida o remanente. La magnetización inducida se debe a que, por la presencia del campo magnético primario, los minerales susceptibles de magnetización se alinean en el sentido del campo magnético principal. Dependiendo de la posición relativa del observador con respecto al campo principal, el pequeño dipolo inducido se añade o se sustrae a dicho campo principal. La magnetización remanente es similar a la anterior; se diferencian en que, una vez que el campo magnético principal desaparece, el remanente permanece mientras que la inducida también se desvanece. La magnetización remanente se origina por la presencia de minerales ferromagnesianos que dan lugar a dipolos permanentes, los cuales se formaron al momento, porque la roca fundida se cristalizaba; su orientación depende, desde luego, de la orientación del campo principal al momento de la cristalización (Quijano, 2007).

El campo magnético de la Tierra varía con el tiempo, lo que se conoce como variaciones seculares. La escala de tiempo puede variar de un día a miles de años. Las variaciones diurnas son del orden de 30 nT, pero pueden llegar a valores de 1000 nT, cuando los vientos solares son intensos. En esos casos, es necesario corregir estas variaciones en los valores observados durante un levantamiento.

La polaridad del campo magnético también presenta inversiones, en periodos que varían de miles a millones de años. Actualmente el polo norte magnético casi coincide con el polo sur geográfico, con una desviación del orden de 11° (Quijano, 2007).

El objetivo final de los estudios magnetométricos es el poder conocer mejor la estructura tridimensional del subsuelo e identificar los cuerpos rocosos cuyas características sean de importancia para el objeto de la prospección, por ejemplo, intrusivos o cuerpos mineralizados.

Existen otros métodos que han sido poco usados como ocurre con el magnetotelúrico o el audiomagnetotelúrico, que debido a que requieren instrumentos muy sofisticados, son muy sensibles al ambiente, o como en el caso del segundo, que aún está en desarrollo, y por lo tanto, no son comúnmente empleados en la exploración geotérmica (Dickson y Fanelli, 2004).

En la Tabla III.3 se sintetizan los métodos geofísicos usados para la prospección geotérmica y los resultados que se obtienen de cada uno de ellos.

Tipo de estudio	Información obtenida
Flujo de calor	Gradiente geotérmico
Sísmica pasiva	Zonas de fracturamiento activas
Sísmica de reflexión	Estructura geológica
Sísmica de refracción	Estructura geológica
Exploración geoelectrica	Detección de conductores someros
Exploración gravimétrica	Distribución de densidades y estructuras mayores
Exploración magnetométrica	Configuración de basamento y presencia de fallas
Exploración magnetotelúrica	Detección de conductores semi-profundos
Estudios paleomagnéticos	Magnetoestratigrafía

Tabla III.2 Tipos de estudios geofísicos y la información que se obtiene de los mismos en proyectos con fines de exploración geotérmica (Tomada de Torres, et al., 1993).

Todos los métodos geofísicos son costosos, algunos más que otros, por lo tanto, no pueden ser usados indiscriminadamente en cualquier situación o condición. En conclusión, un método que produce excelentes resultados en la determinación del ambiente geológico, también puede dar resultados insatisfactorios el uso de un método inadecuado (Dickson y Fanelli, 2004).

El orden reduce costos, por lo que es muy importante que el método seleccionado sea adecuadamente elegido por geofísicos que trabajen en estrecha relación con geólogos.

La perforación de pozos exploratorios representa la fase final de todo el programa de exploración geotérmica, de hecho, es el único medio para determinar las características reales del yacimiento geotérmico, y de esta manera evaluar su potencial. Los datos que proveen los pozos exploratorios deben ser capaces de verificar todas las hipótesis y modelos elaborados durante la exploración en superficie; se debería confirmar si el yacimiento es productivo y contiene los fluidos característicos adecuados para la utilización a que están destinados, es por todo lo anterior que la ubicación de pozos exploratorios es una operación delicada.

TEMA IV APLICACIONES Y USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

IV.I GENERALIDADES

La energía geotérmica es un recurso natural que se encuentra en la mayoría de los países del mundo, corresponde con una forma de energía renovable, noble, limpia y fácil de explotar. Los primeros usos que se le dieron fueron la calefacción ambiental y los baños medicinales, aprovechando sus altos contenidos de minerales; posteriormente se le utilizó en la agricultura, calefacción industrial y doméstica, refrigeración doméstica e industrial, etc. En la actualidad se está utilizando principalmente para la generación de energía eléctrica, aunque la calefacción ambiental e industrial continúa representando uno de los usos más significativos en muchas naciones que buscan reducir el consumo de combustibles fósiles y nucleares. También se le utiliza para recreación en los balnearios de aguas termales y con fines terapéuticos.

En el artículo *¿Qué es la energía geotérmica?*, de Dickson y Fanelli (2004), relatan cómo es que los intentos para generar electricidad a partir de la geotermia se remontan a principios del Siglo XIX, cuando comenzaron las aplicaciones prácticas que precedieron a la investigación científica; fue en ese entonces que los fluidos geotermales fueron explotados por su contenido energético. En ese período se instaló en Italia una industria química en la zona actualmente conocida como Larderello, para extraer el ácido bórico de las aguas calientes boratadas que emergían naturalmente en manantiales o bien, de pozos perforados con ese objeto. El ácido bórico se obtenía mediante evaporación de las aguas boratadas en recipientes de fierro, usando como combustible la madera de los bosques de los alrededores. En 1827 Francisco Larderel, fundador de esta industria, desarrolló un sistema para utilizar el calor de los fluidos en el proceso de evaporación, en vez de quemar la madera de los bosques en rápida decadencia (Figura IV.1).

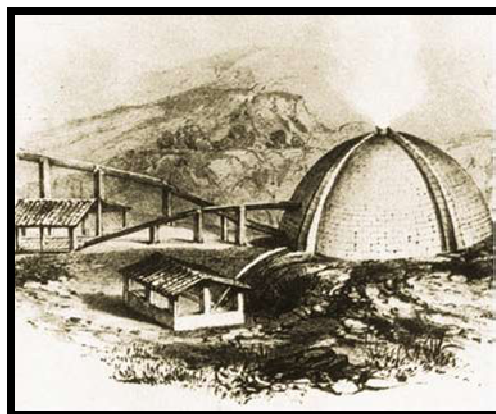


Figura IV.1 Imagen de “La laguna cubierta”, sistema usado en la primera mitad del Siglo XIX en el área de Larderell, Italia, para coleccionar las aguas boratadas calientes y extraer el ácido bórico (Tomada de Dickson y Fanelli, 2004).

La explotación del vapor natural por su energía mecánica asociada empezó en ese mismo tiempo. El vapor geotérmico se utilizó para elevar líquidos en primitivos elevadores por presión de gas y más tarde en bombas recíprocas y centrífugas y en poleas, todo lo cual fue utilizado en las perforaciones o en la industria local de ácido bórico. Entre 1850 y 1875 la planta de Larderello mantuvo en Europa el monopolio de la producción de ácido bórico. En 1904 se llevó a cabo el primer intento de generar electricidad a partir de vapor geotérmico; nuevamente, esto tuvo lugar en Larderello (Fig. IV.2).



Figura IV.2 Imagen de la máquina usada en Larderello en 1904 en la primera experiencia de generación de energía eléctrica mediante vapor geotérmico, con su inventor, el Príncipe Piero Ginori Conti (Tomada de Dickson y Fanelli, 2004).

En 1892 entró en operaciones el primer sistema distrital de calefacción geotermal, en Boise, Idaho (USA). Entre 1910 y 1940 el vapor de baja presión fue utilizado para calefacción de invernaderos, edificios industriales y residenciales, en Toscana. Otros países también empezaron a desarrollar sus recursos geotérmicos a escala industrial, tal es el caso de Islandia, que en 1928 fue un país pionero en la utilización de la energía geotérmica, ya que inicio la explotación de sus fluidos geotermales (principalmente agua caliente) para calefacción doméstica (Dickson y Fanelli, 2004).

El éxito de estas experiencias fue una clara demostración del valor industrial de la energía geotérmica y marcó el comienzo de una forma de explotación que se ha desarrollado significativamente desde entonces, como ocurrió en Larderello, la generación de electricidad fue un suceso comercial. En 1942 la capacidad geotermoelectrica instalada alcanzaba los 127,650 KW pronto varios países siguieron el ejemplo de Italia. En 1919 fueron perforados los primeros pozos geotermales de Japón, en Beppu, seguidos en 1921 por pozos perforados en The Geysers, California, USA, y en el Tatio, Chile. En 1958 entra

en operación una pequeña planta geotermoeléctrica en Nueva Zelandia, en 1960 en USA, seguidos por otros países en los años siguientes.

Después de la Segunda Guerra Mundial muchos países fueron atraídos por la energía geotérmica, considerándola económicamente competitiva respecto de otras fuentes energéticas.

En México, los primeros estudios e investigaciones sobre el aprovechamiento del vapor del subsuelo para la generación de electricidad iniciaron alrededor de 1955, a lo largo del Eje Neovolcánico, en la parte central del país (Reyes, 1987). Entre las diversas áreas localizadas con manifestaciones termales superficiales, se eligió para llevar a cabo estudios de detalle, la zona de Pathé, al oeste de la ciudad de Pachuca, Hidalgo; fue en ella que en 1959 se puso en operación la primera planta geotermoeléctrica con una capacidad de 600 KW. Ahí se entrenaron los primeros técnicos y se obtuvieron las primeras experiencias en el aprovechamiento de ésta fuente de energía.

Con este inicio tan exitoso y por las características geológicas de nuestro país, sobre todo en áreas volcánicas, se reforzó la idea de explorar y explotar comercialmente este recurso mediante arduos programas para ello, los cuales implican diversos estudios, trabajos e inversiones. Así en un comienzo, se llegó a localizar aproximadamente 310 focos termales en la República Mexicana, y lo principal fue que se logró explotar este recurso en el campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, y en los Azufres, Michoacán.

La energía geotérmica se aprovecha de diversas formas explotando los depósitos subterráneos naturales de vapor y agua caliente. Estos últimos aparecen principalmente en lugares donde las temperaturas bajo la superficie son elevadas debido a la actividad volcánica relativamente reciente. La energía geotérmica se utiliza principalmente de dos maneras: el vapor y el agua caliente que se emplean para calentar y para generar electricidad.

Aunque el mayor desarrollo en materia geotérmica se ha concentrado en los llamados sistemas de alta entalpía, alta temperatura o alto nivel, es importante darle un mayor énfasis al desarrollo de lo que se conoce como usos geotérmicos alternos, que consisten básicamente en la utilización de los sistemas de baja entalpía, y en la obtención de minerales de las salmueras geotérmicas.

Los sistemas de baja entalpía presentan tres ventajas básicas sobre los sistemas de alta entalpía, estas son (Reyes, 1987):

- Son mucho más numerosos los campos geotérmicos de baja entalpía.
- Su explotación no requiere de las grandes inversiones e instalaciones como ocurre con los sistemas de alta entalpía.
- Su diversidad de usos es mucho mayor.

Si bien es cierto que la energía geotérmica no tiene la capacidad para resolver todos los grandes problemas de energía que aquejan a la humanidad, actualmente son aprovechados en gran manera.

La utilización principal de los sistemas de alta entalpía son para generar electricidad, se emplean junto con sistemas de cogeneración que aprovechan el vapor o mezclas sobrantes, que generalmente salen con temperaturas más bajas (pero susceptibles de aprovecharse); se pueden aliviar también cargas importantes de energía calorífica e incluso de potencia en baja escala. Sin embargo, este tipo de yacimientos son relativamente pocos, al compararlos con los de baja entalpía, por lo que en la mayoría de los países, éstos últimos se han venido utilizando cada vez más, principalmente, en bombas de calor, calefacción y otros usos diversos.

En la Figura IV.3 Stefansson (2005), relaciona la abundancia de yacimientos geotérmicos con su temperatura, pudiéndose ver que los yacimientos de baja entalpía, con temperaturas menores de 130° C, se encuentran en mayor número.

Por ejemplo, por cada yacimiento de 250° C hay más de cinco de 100° C y tres y medio de 150° C. Por tanto, los yacimientos de baja temperatura son más numerosos y pueden ser explotados en muchos países del mundo.

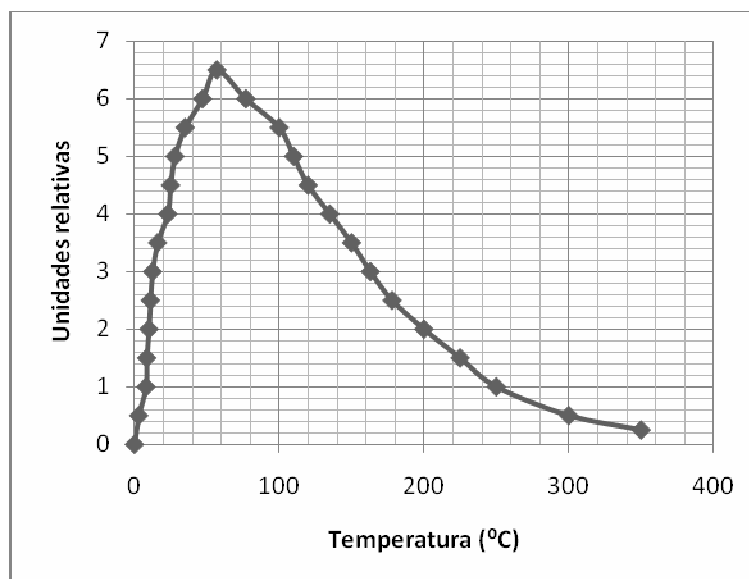


Figura IV.3 Abundancia de los yacimientos geotérmicos con base en su temperatura (Stefansson, 2005).

La importancia de los yacimientos de alta entalpía estriba en que se utilizan principalmente para la generación de electricidad y, según Stefansson (2005), representan el 32% de los yacimientos de más de 130° C.

Los elevados precios actuales de los hidrocarburos, la declinación de reservas del petróleo, así como la aceptación del Protocolo de Kyoto, están

favoreciendo la instalación de plantas geotérmicas a nivel global, las cuales han tenido un aumento relevante en los últimos años (Tabla IV.1). En 2005 la generación geotermoeléctrica mundial fue de 56 798 GWh, equivalente al 0.4% de la generación mundial de energía eléctrica (que fue de 15.8 millones de GWh, EIA, 2006), pero se estima que para el año 2010 representará alrededor del 1% (Bertani, 2005).

	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010
CAPACIDAD INSTALADA MW	1300	3887	4764	5832	6798	7974	8912	13500*
GENERACIÓN ANUAL DE ELECTRICIDAD GW	-	-	-	-	37,774	49,261	56,798	141,000*

*Capacidad proyectada

Tabla IV.1 Capacidad instalada y generación geotermoeléctrica en el mundo (Bertani, 2005).

En 2009, México ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en la explotación de la energía geotérmica, con una capacidad instalada de 958 MWe en cuatro campos geotérmicos de elevada entalpía, con una generación anual de 6312 GWh (Tabla IV.2), lo que corresponde al 3.16 % de la generación eléctrica en el país (Secretaría de Energía, 2009).

	CERRO PRIETO	LOS AZUFRES	LOS HUMEROS	LAS TRES VÍRGENES	TOTAL
CAPACIDAD INSTALADA MW	720	188	40	10	958
GENERACIÓN ANUAL DE ELECTRICIDAD GWh	5 112	852	315	33	6312

Tabla IV.2 Capacidad instalada y generación geotermoeléctrica en México (Datos tomados de geotermia.org.mx, 2009).

El posible potencial eléctrico total de los recursos geotérmicos a nivel mundial es del orden de 1.5 Terawatts eléctricos (TWe), de acuerdo con Stefansson (2005), (Tabla IV.3).

Para darse una idea de lo que ello significa, considérese que la capacidad eléctrica total de México es del orden de los 0.05 TWe, por lo que el potencial geotermoeléctrico mundial es treinta veces mayor. Es decir, los recursos geotérmicos del mundo podrían satisfacer la demanda de energía eléctrica de 30 países de las dimensiones de México a niveles de consumo actual.

	Potencial Identificado	Potencial Posible
RESERVAS ÚTILES PARA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD*	0.2 TW _e	1- 2 TW _e
RESERVAS ÚTILES PARA UTILIZACIÓN DIRECTA	4.1 TW _t	22 - 44 TW _t
POTENCIA TOTAL	6.0 TW _t	30 - 60 TW _t

* Se considera que sólo el 10% de la energía térmica se puede convertir en energía eléctrica.

Tabla IV.3. Potencial mundial estimado de los recursos geotérmicos (EIA, 2006).

El potencial de usos directos de la geotermia en el mundo ha sido estimado en 4.1 TWe, con un potencial posible varias veces superior (EIA, 2006), como se indica en la misma Tabla IV.3

Por otra parte, cada vez hay más países que emplean la energía geotérmica de baja entalpía en usos directos. La principal restricción al uso de la energía geotérmica es la dificultad para su transporte, por lo que preferentemente se trata de transformarla a energía eléctrica. En compensación a esta deficiencia, se tiene su versatilidad para la utilización directa, lo cual se muestra en la Figura IV.4. En esta tabla se dan los usos posibles de los fluidos geotérmicos con la temperatura mínima requerida para éstos, con base en el diagrama de Lindal.

Gracias al avance de la tecnología se han podido superar muchos problemas en la utilización de la energía geotérmica y en la actualidad es posible aprovechar sus recursos en un rango muy amplio de temperaturas, o bien explotarlos "en cascada", lo cual equivale a seguir extrayendo energía de los fluidos que han pasado ya por alguna etapa de su uso: por ejemplo los fluidos que son desechados por una estación geotermoeléctrica a una temperatura de más de 100°C, pueden aún ser utilizados para el enlatado de comida, extracción de sales y posteriormente para calefacción, refrigeración, invernaderos, etc., hasta que finalmente, ya a una temperatura menor de 30°C, sean usados en albercas para recreación o en criaderos de peces (Prol, 1995).

De esta forma, se extrae el contenido energético de los fluidos geotérmicos con un máximo de eficiencia. En varios países como Nueva Zelanda y Francia, se implementa ya la utilización "en cascada" por ser económicamente más rentable.

Es necesario aclarar que la temperatura no es el único requerimiento para el uso de la energía geotérmica, sino que para su explotación comercial es necesario contar con los siguientes factores: la disponibilidad de suficiente fluido (agua y/o vapor) para que transporte el calor de las profundidades a la superficie de zonas permeables que permitan este transporte y a la vez de una recarga que reemplace al fluido que es extraído. Además, es preferible que los

fluidos geotérmicos estén libres de productos químicos que puedan corroer o dañar las instalaciones para su extracción y aplicación (Prol, 1995).



Figura IV.4 Diagrama que muestra la utilización de los fluidos geotérmicos, modificando el diagrama de Lindal, 1973 (Modificada de Dickson y Fanelli, 2004).

El uso directo más extendido de la geotermia son las bombas de calor, en las que se emplea más de la mitad de la capacidad instalada en el mundo, la Figura IV.5 muestra los principales usos directos que se le da a la energía geotérmica en el mundo.

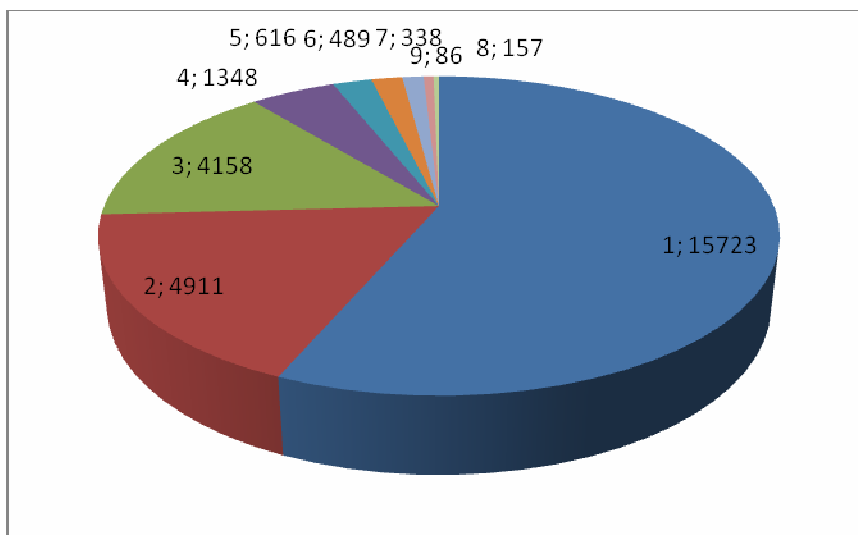


Figura IV.5 Usos directos de la geotermia en el mundo. 1.Bombas de calor, 2.Balneología, 3.Calefacción 4.Invernaderos 5.Acuicultura 6.Usos industriales 7.Fundición de nieve 8.Secado agrícola 9.Otros usos (cifras en MW; datos de Lund et al., 2005).

A continuación, se hace un recorrido por los diversos usos y aplicaciones que se le da a la energía geotérmica en general.

IV.2 PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

La transformación de la energía geotérmica en eléctrica es tal vez su mayor aplicación práctica (casi la tercera parte) y la que atrajo la atención en el nivel mundial hacia este recurso, ya que de las fuentes alternas de energía, es una de las que han demostrado ser económicamente más factibles. La obtención de electricidad a partir de fluidos geotérmicos tiene una eficiencia relativamente baja en comparación con las plantas termoeléctricas convencionales, debido a la baja temperatura de los fluidos geotérmicos (que tienen un máximo de aproximadamente 380°C). Sin embargo, las plantas geotermoeléctricas son económicamente redituables debido al costo tan bajo del calor obtenido (en comparación con los combustibles fósiles), además de las ventajas que tiene en cuanto a un mínimo de contaminación ambiental. En el caso de la geotermia, se han estudiado los efectos que la explotación de un campo puede tener sobre la flora y la fauna local, y aun cuando todavía quedan muchas investigaciones por hacer, se puede decir con base en la evidencia que se tiene en la actualidad, que es ésta una de las formas de energía que genera menos contaminación, sobre todo en comparación con los combustibles fósiles (que son de los mayores y más peligrosos agentes de degradación ambiental) y con los problemas de contaminación radiactiva que aún no se han resuelto en la utilización pacífica de la energía nuclear.

Aprovechar los recursos geotérmicos para generar energía eléctrica no es algo nuevo. Las primeras plantas geotermoeléctricas empezaron a funcionar en Italia a principios de la década de los treinta, en el campo geotérmico de

Larderillo, y en el continente americano la primera planta de este tipo se instaló en el campo de Pathé, México, en 1959. Se trataba de una unidad de 3.5 MW de capacidad, adquirida en Italia, que entró en operación el 20 de noviembre de 1959. Aunque solo generó una fracción de su capacidad, estuvo operando hasta 1973, año en que fue desmantelada (Quijano y Gutierrez, 2005). Actualmente se exhibe como pieza de museo en las instalaciones del campo geotérmico de los Azufres, Michoacán, operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Una planta geotermoeléctrica es una instalación empleada para la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada en forma de calor, en este caso ese calor es el que proviene de los fluidos geotérmicos, éste es empleado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica.

Hay varias maneras de generar electricidad con fluidos geotérmicos (Maya y Gutiérrez, 2007). Las más sencillas consisten en utilizar unidades a contrapresión en las que el vapor se descarga directamente a la atmósfera, después que se le ha hecho pasar por la turbina (Figura IV.6).

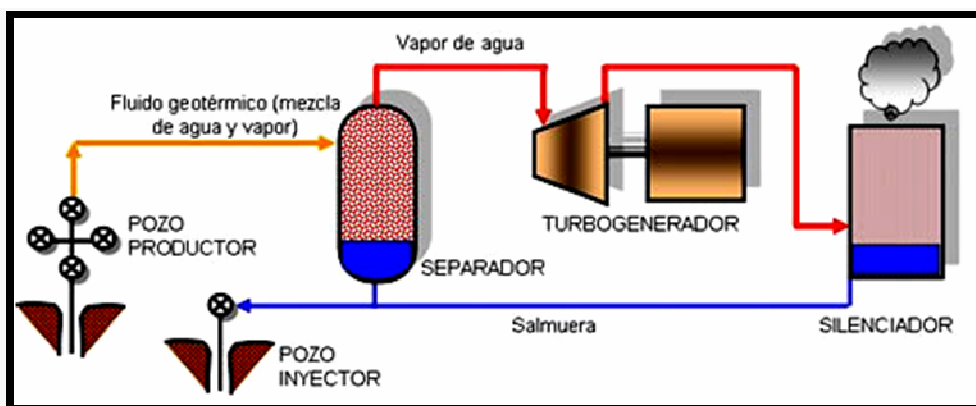


Figura IV.6 Esquema de una unidad geotermoeléctrica a contrapresión (Tomado de Maya y Gutiérrez, 2007).

Otra manera de generar energía eléctrica, es emplear una unidad a condensación, en la cual el vapor después de pasar por la turbina, pasa a un condensador que trabaja a una presión menor que la atmosférica (Figura IV.7). Las unidades a contrapresión son más baratas, ya que carecen de condensador y torre de enfriamiento, pero son menos eficientes pues requieren del orden de 12 toneladas de vapor para generar un megawatt-hora (MWh). Las unidades a condensación ameritan más inversión, aunque son más eficientes, ya que necesitan del orden de 8 toneladas por MWh generado (Maya y Gutiérrez, 2007).

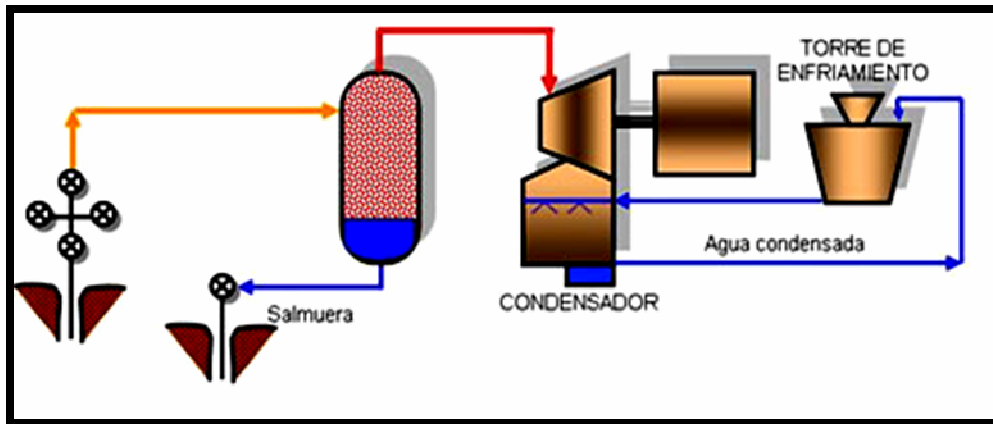


Figura IV.7 Esquema de una unidad geotermoeléctrica a condensación (Tomado de Maya y Gutiérrez, 2007).

Un tercer tipo de unidad geotermoeléctrica es la de ciclo binario (Figura IV.8), en esta se utiliza un intercambiador de calor para que el fluido geotérmico (agua o vapor) caliente a un fluido de trabajo con un punto de ebullición inferior al del agua. Es justamente este fluido el que se hace pasar por la turbina, mismo que posteriormente es condensado y vuelto a pasar por el intercambiador, en un proceso cíclico y continuo. Este arreglo es el más caro, pero permite aprovechar los fluidos geotérmicos de temperaturas inferiores que, de otro modo, tal vez no podrían utilizarse para generar electricidad (Maya y Gutiérrez, 2007).

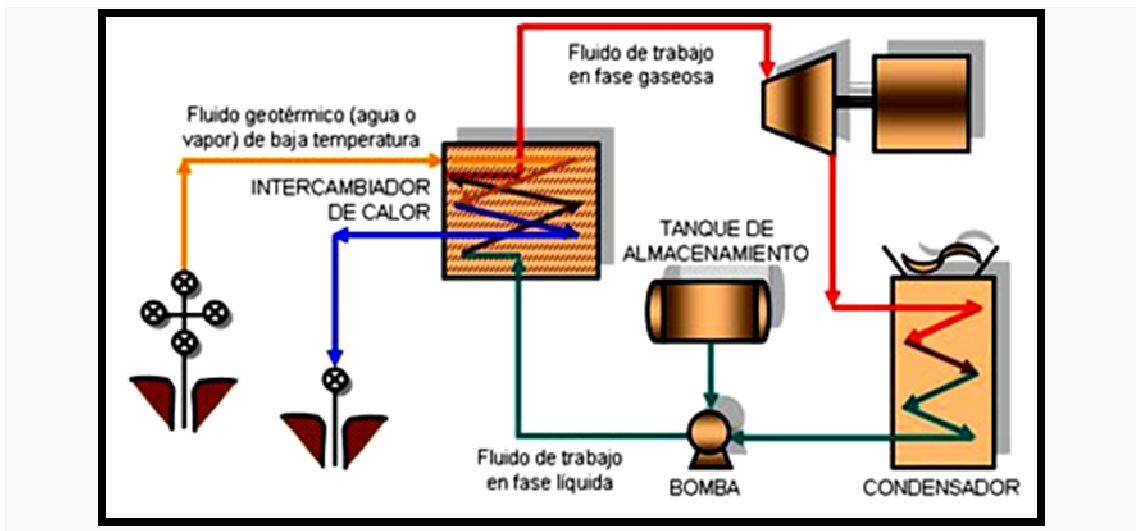


Figura IV.8 Esquema de una unidad geotermoeléctrica de ciclo binario (Tomado de Maya y Gutiérrez, 2007).

Otro tipo de centrales geotermoeléctricas son las de flasheo simple y flasheo doble.

Las centrales de Flash Simple son las más utilizadas en la actualidad, son de costo moderado y permite un buen aprovechamiento de la energía del fluido, su configuración se muestra esquemáticamente en la Figura IV.9 y consta de un

separador o cámara de flash, una turbina, un generador y un sistema de condensación. En la cámara de flash el fluido proveniente de los pozos, es despresurizado dejándolo en la presión de diseño de la turbina. Este efecto de despresurización ayuda a aumentar la fracción másica de vapor del flujo, desde el separador el vapor es conducido hacia el conjunto turbina-generador donde se obtiene la potencia eléctrica. El líquido que queda en la cámara de flash, resulta ser una solución salina muy concentrada pues quedan contenida en ella sales minerales y otros sólidos provenientes del yacimiento. La solución salina es conducida a una torre de enfriamiento junto con el vapor proveniente de la turbina. En la torre el vapor se condensa y el fluido en general se enfría. Posteriormente el fluido es retirado de la torre y dejado en una pileta de evaporación desde donde se extrae posteriormente para su inyección en el reservorio (Cardemil, 2006).

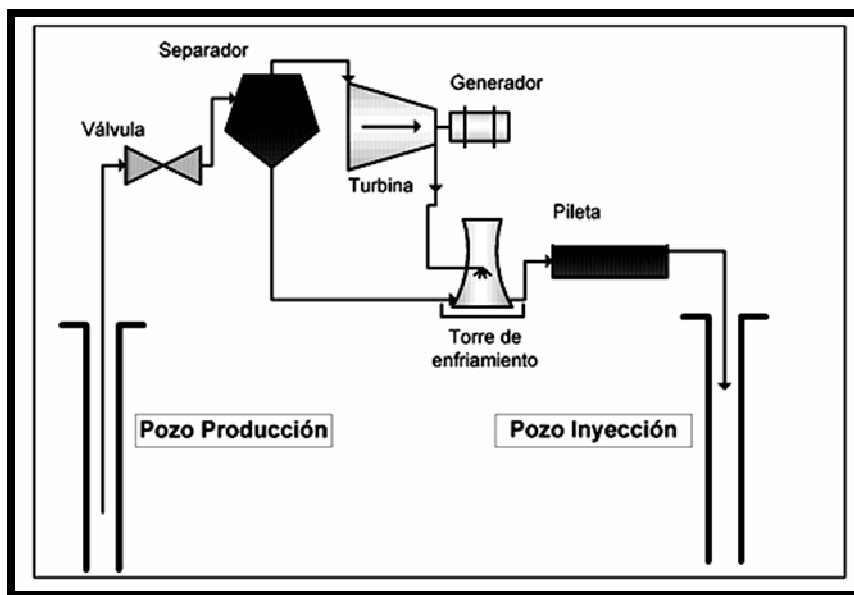


Figura IV.9 Unidad geotermoeléctrica de flasheo simple (Tomada de Cardemil, 2006).

La configuración de las centrales con doble cámara de flash es similar a las de flash simple (Cardemil, 2006), sin embargo aumentan la eficiencia considerablemente al incluir dos conjuntos turbina-generador, uno de alta presión y otro de baja presión según muestra la Figura IV.10. En este caso el fluido proveniente de los pozos es conducido hacia un separador inicial donde se extrae el flujo de vapor de alta presión que es conducido a la turbina correspondiente; el líquido que se queda en el separador se extrae y se conduce hacia un segundo separador de menor presión, previo paso por eyectores de vapor que producen evaporación súbita o flash. En el segundo separador se unen ambos flujos y se extrae el vapor para alimentar la turbina de baja presión. Una vez extraída la potencia eléctrica, el flujo de vapor se conduce a un sistema de enfriamiento idéntico al descrito para el caso de Flash Simple, con una torre de enfriamiento y una pileta de evaporación.

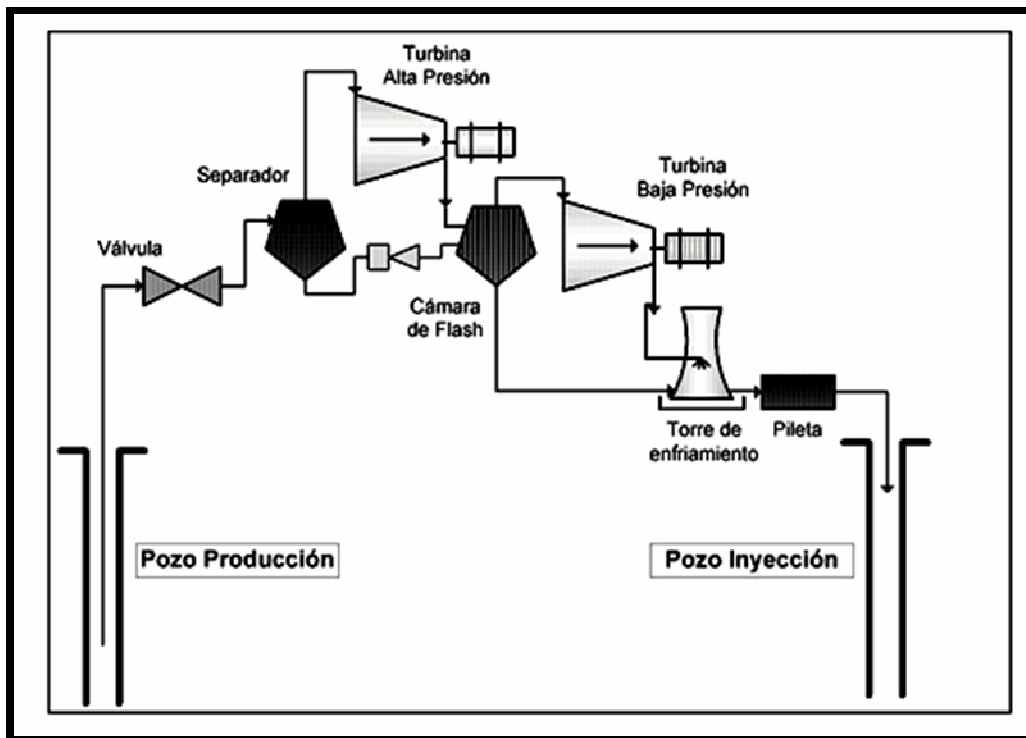


Figura IV.10 Unidad geotermoeléctrica de flasheo doble (Tomada de Cardemil, 2006).

Los cinco tipos de unidades geotermoeléctricas aquí mostradas se emplean rutinariamente para generar energía eléctrica de manera comercial, tanto en México como en el resto del mundo.

Actualmente la producción de electricidad con energía geotérmica es aún baja con respecto al total de energía producida en el ámbito mundial. Una de las principales restricciones es la localización de sistemas geotérmicos, ya que son relativamente muy pocos los países que cuentan con este recurso en cantidades necesarias para generar electricidad. Como ejemplo de países con un potencial geotérmico importante para la producción de energía eléctrica tenemos a Japón, Filipinas, Indonesia, Italia, Islandia, Estados Unidos, México, El Salvador, Nicaragua y Nueva Zelanda.

IV.3 BALNEOLOGÍA

Se entiende por balneología el estudio e investigación de los medios curativos naturales que se dan en un determinado lugar utilizando agua, al que se denomina balneario, especialmente cuando se utiliza para fines medicinales, por ejemplo para diferentes terapias.

La balneología es el uso más antiguo que se le ha dado a la energía geotérmica. Desde hace muchos siglos varios pueblos como los romanos, griegos, aztecas, japoneses, turcos, maoríes y algunos otros, utilizaban los manantiales termales para tomar baños, ya que las inmersiones en agua caliente son relajantes para los músculos cansados o bien, ingerían las aguas

del manantial, que a menudo consideraban medicinales. Sin embargo, muchas de las propiedades curativas que se les atribuyen carecen de una comprobación científica, aunque sí se sabe que algunas aguas de origen termal tienen efectos laxantes (Prol, 1995).

En la actualidad, la balneología es uno de los usos más extendidos de los manantiales termales, ya que éstos pueden ser utilizados para este fin en un rango muy amplio de temperaturas y composiciones, lo cual no es válido para otros usos. Las aguas de los manantiales termales se utilizan no sólo en balnearios, spas, etc. sino que también son embotelladas para consumo humano en una gran variedad de aguas minerales que se venden en todo el mundo.

La balneología es considerada por muchos autores como una subutilización de la energía geotérmica, ya que esta aplicación no implica ninguna elaboración o transformación de los fluidos geotérmicos y, sin embargo, este uso a nivel mundial representa una cantidad importante de energía utilizada.

En México existen muchos lugares donde la energía geotérmica es usada para balneología, sin embargo, aquí sólo citaremos cinco ejemplos de ello.

IV.3.1 Tequisquiapan, Querétaro

El territorio del municipio de Tequisquiapan se encuentra ubicado en la parte central de la República Mexicana, a los 20° 39' de latitud Norte y a los 99° 50' de longitud oeste (Figura IV.11).

El territorio de Tequisquiapan, Querétaro, se encuentra situado en la altiplanicie mexicana, en las estribaciones australes de la Sierra Gorda, y donde se localizan zonas relativamente planas que forman pequeños valles y planicies que se han convertido en áreas de cultivo.

En cuanto a geología, en la mayor parte de la región afloran rocas ígneas extrusivas y sedimentarias continentales recientes. Las rocas ígneas extrusivas son riolitas, andesitas y basaltos, con sus correspondientes derivados piroclásticos (INEGI, 2007).

La mayor parte de las elevaciones están formadas por riolitas poco compactas y generalmente de textura porfídica, de color rosado que presentan un fuerte fracturamiento. Las fracturas se presentan generalmente rellenas por cuarzo y en ocasiones por vesículas de cuarzo y ópalo. En locaciones aledañas como el Cerro de San Nicolás, se localizan capas alternadas de riolitas, tobas y andesitas, siendo las riolitas las que se presentan con mayor abundancia, en proporción de 10 a 15 metros y de 2 a 4 de andesitas, observándose en todas las rocas un fuerte fracturamiento (INEGI, 2007).

Sobre el área en que se encuentra situada la población, se extiende una secuencia de andesitas que parte del cerro de San José y que se continúa por el curso del Río San Juan y atraviesa la población de Tequisquiapan.

Todas estas rocas son de color gris lustroso y con abundantes vesículas y esferulitas de textura vítrea, que tienen por componentes principales vidrios perlíticos con esferulitas de ortoclasa y algunos fenocristales de feldspatos ácidos; también estas rocas presentan un intenso fracturamiento, localizándose las fracturas mayores de NW a SE, y las fracturas de menor grado se presentan perpendiculares a las anteriores (INEGI, 2007).

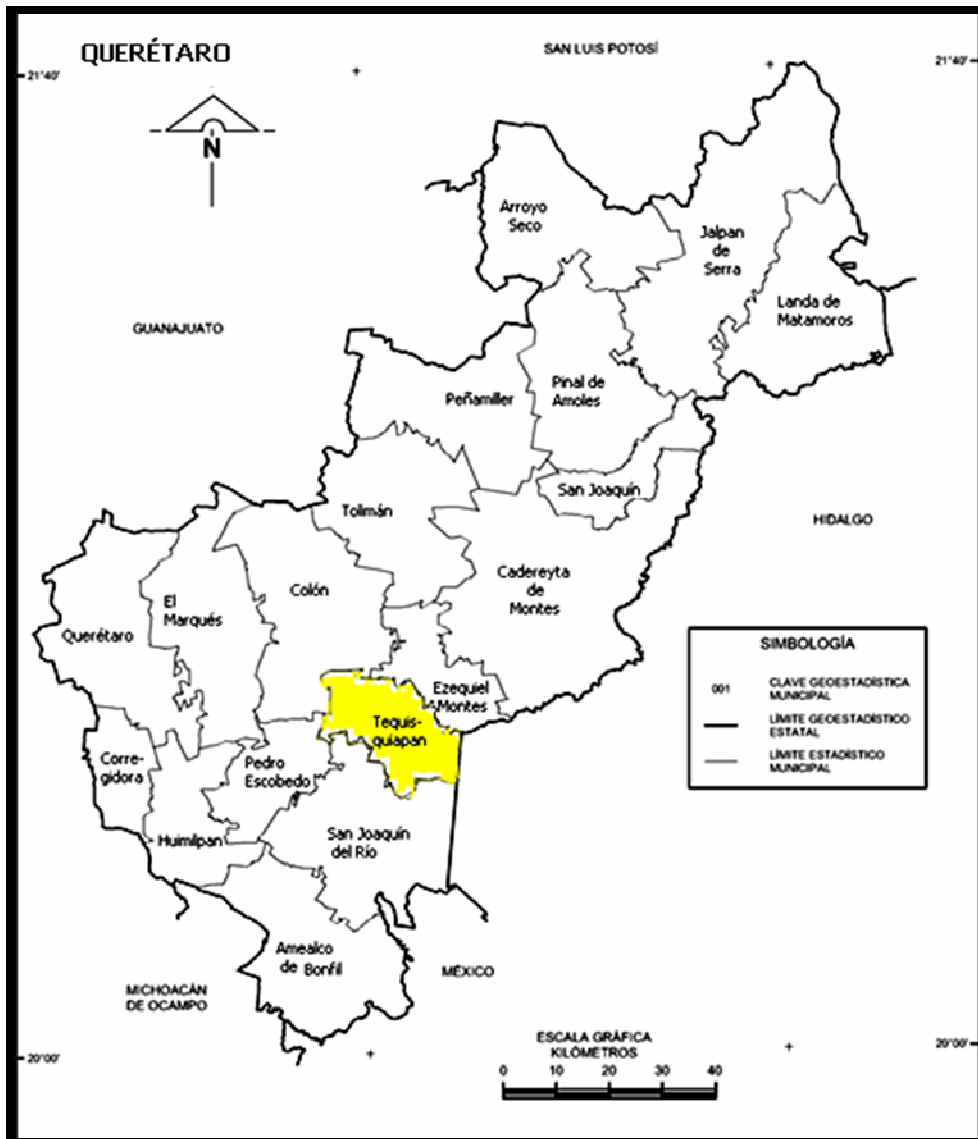


Figura IV.11 Localización de Tequisquiapan, Querétaro. (Tomada de INEGI, 2007).

Se tiene como rasgo estructural relevante una falla en el Cerro de San José, la cual tiene un rumbo SW 10° NE, que hace que en el Cerro se forme un escalón con desplazamientos hacia el Norte. Por donde corre el Río San Juan, en donde existe otra falla; el marcado cambio de temperatura que presentan las aguas subterráneas a uno y otro lado del cauce del río, así como la brusca

terminación del derrame de andesita y el encajonamiento del Río San Juan, son evidencias de la existencia de dicha falla.

Las rocas que forman la serranía más elevada de la región localizada al Oriente del valle, están formadas de andesitas y basaltos. Son rocas que varían de color negro a rojizo, con textura vesicular y poco compacta.

También son de considerable abundancia los afloramientos de tobas riolíticas, pues cubre la mayor parte de las tierras bajas y gran extensión de laderas de los cerros. Frente al Barrio de la Magdalena, sobre el Río San Juan, se presenta el afloramiento de mayor importancia (INEGI, 2007).

Las principales formaciones que constituyen el acuífero están localizadas en tobas riolíticas permeables de carácter arenoso y sedimentos recientes. Productos derivados principalmente de la erosión de riolitas y en menor escala de tobas y basaltos, forman los depósitos terrígenos continentales en esta región. Estos depósitos afloran en los cauces de los ríos y arroyos, están formados por arcillas, arenas y gravas. En pozos de varios lugares aledaños, las tobas y sedimentos continentales tienen un espesor de más de 250 metros, por lo que es de considerarse que sean sumamente abundantes a profundidad, habiendo quedado sepultados por derrames volcánicos posteriores (INEGI, 2007)

En los balnearios de esta zona, la temperatura superficial del agua es de 32°C en promedio, y de 50 a 100°C en el interior de la fuente, los fluidos geotermales son predominantemente sódico-clorurados, y corresponden a manantiales tibios de baja entalpía, con bajas concentraciones de elementos, con una fuente de calor normal o ligeramente anómala (Torres, et al., 1993).

IV.3.2 Santa María del Río, San Luis Potosí

El municipio de Santa María del Río, se ubica en la porción sur del Estado de San Luis Potosí y con relación a la capital del estado, se localiza a una distancia aproximada de 45 km, queda comprendida entre las coordenadas geográficas 21° 45' a 22° 00' de latitud norte y 100° 40' a 101° 00' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 942 km² (Figura IV.12). Está dentro de la Provincia Fisiográfica de la Mesa Central, que se caracteriza por presentar sistemas intermontanos de variadas alturas, con valles de amplios desarrollos entre dichos sistemas (Ayuntamiento Santa María del Río, 2005).

Geológicamente, la unidad más antigua es del Cretácico y está constituido por una secuencia que pertenece a la Formación Caracol, de edad Cretácico superior (Campaniano-Maastrichtiano). Sobreyaciendo discordantemente a esta Formación, se tienen sedimentos clásticos continentales del Terciario, constituidos por conglomerado, arenisca poco consolidada, limos y arcillas, con un espesor de 160 m. Sobreyacen discordantemente una serie de rocas volcánicas que constituyen parte del Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP) de edad Oligoceno, constituidas de la base a la cima por derrames andesíticos (SGM, 2007).

En el Mioceno se depositó el Basalto Cabras, estos derrames se observan dentro de las inmediaciones de Santa María del Río, los que morfológicamente forman mesetas alargadas. Cubriendo discordantemente a las rocas antes mencionadas y como relleno de depresiones se tiene sedimentos continentales del Plioceno con un alcance hasta el Holoceno, constituido por un conglomerado polimictico, arenas y limos, así como materiales de talud, y aluviones del Holoceno. La secuencia sedimentaria antes mencionada, está cortada por un dique de composición pórfido riolítico (SGM, 2007).

La orientación de las estructuras de las rocas más antiguas (N75°W) indican que se deformaron como resultado de esfuerzos compresivos en dirección N 15° E. No existen evidencias en los estratos de más de una fase de deformación, por lo que se considera que los esfuerzos tectónicos que ocasionaron que la secuencia marina turbidítica se levantara, plegara y fuera ensamblada hasta su posición actual, correspondieron a la Orogenia Laramide de fines del Cretácico a principios del Terciario (SGM, 2009).

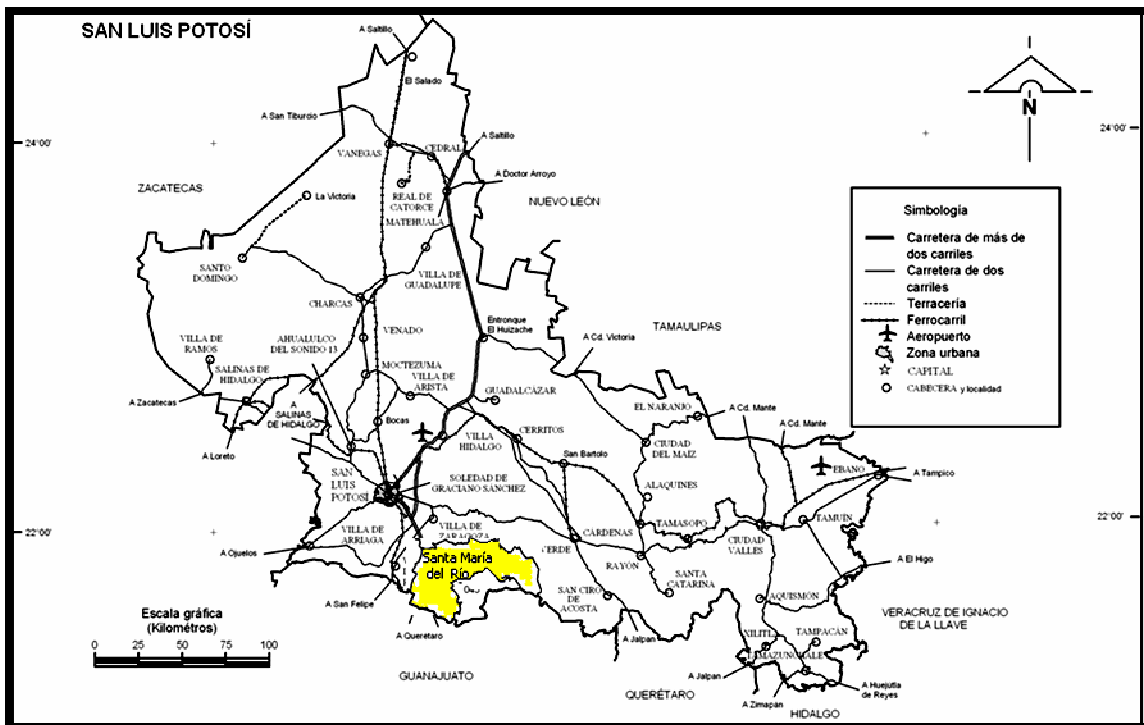


Figura IV.12 Localización geográfica de Santa María del Río, SLP (Tomada de INEGI, 2008).

Al cesar los esfuerzos compresivos, siguió una época de relajamiento y erosión de las montañas, lo que originó sistemas de fallas normales formando grabens en los que se depositó discordantemente, una secuencia continental de gravas, arenas y arcillas con algunas intercalaciones de derrames volcánicos. En el Oligoceno medio (32 millones de años), se inició una intensa actividad volcánica, que se observa en la parte oriental de la zona donde se tiene el inicio del desarrollo del Campo Volcánico Santa María del Río (SGM, 2007).

En este municipio se aprovechan las aguas termales provenientes de manantiales que corresponden a sistemas de baja entalpía y bajas concentraciones de elementos. En balnearios como el de Lourdes, la temperatura del agua superficial en promedio es de 32°C, mientras que en las zonas más profundas alcanza valores de 100 hasta 200° C, y los líquidos geotérmicos son predominantemente sódico-clorurados (Torres, et al., 1993).

IV.3.3 Los Azufres, Michoacán

La zona geotérmica los Azufres se encuentra en el Municipio de Hidalgo, en el estado de Michoacán.

El Municipio de Hidalgo, está al noroeste del Estado de Michoacán, en las coordenadas 19° 42' de latitud norte y 100° 33' de longitud oeste, a una altura de 2,040 metros sobre el nivel del mar (Figura IV.13). Limita al norte con Queréndaro, Zinapécuaro y Maravatío; al este con Irimbo, Tuxpan y Jungapeo; al sur con Tuzantla y Tiquicheo; y al oeste con Tzitzio, Quréndaro, Indaparapeo y Charo. Su distancia a la capital del Estado es de 104 kms. Tiene una superficie es de 1,063.06 Km² y representa un 1.78 por ciento del total del Estado (Ayuntamiento de Hidalgo, 2005).

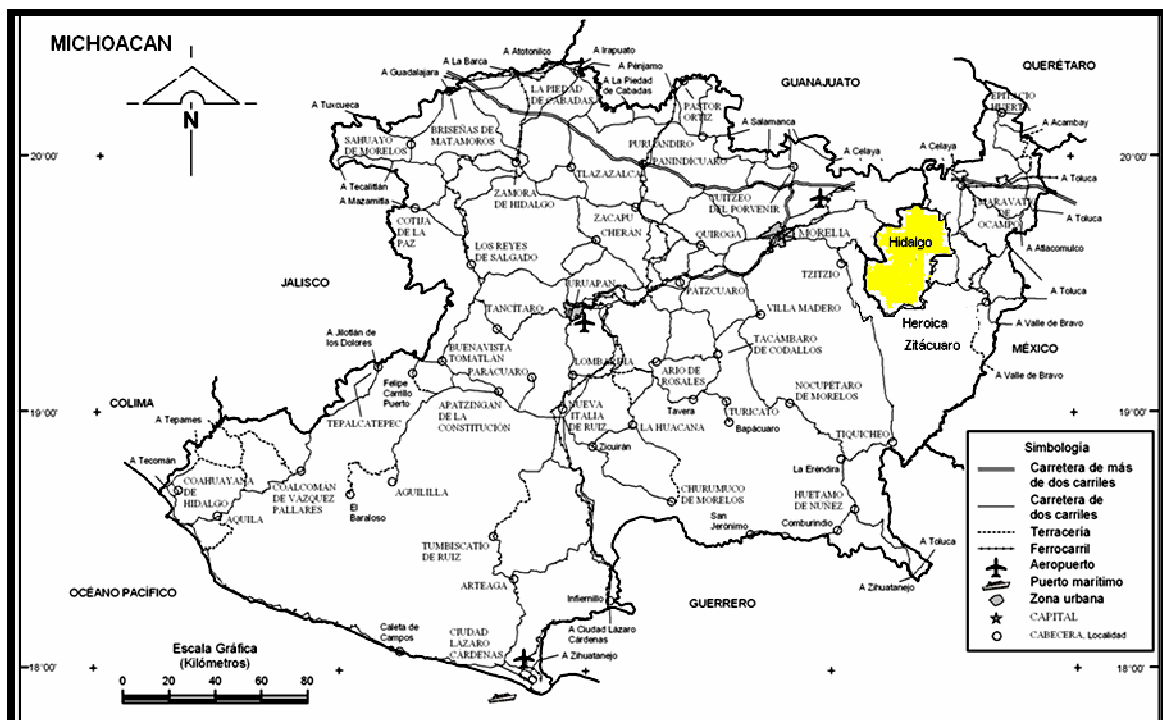


Figura IV.13 Localización del municipio de Hidalgo, estado de Michoacán (Tomada de INEGI, 2008).

En esta zona hay una gran cantidad de manantiales de aguas termales, consideradas como terapéuticas o curativas, lo que ha dado origen al establecimiento de numerosos balnearios.

El basamento local del campo geotérmico de Los Azufres está constituido por un paquete de más de 2,000 m de espesor de derrames andesíticos con intercalaciones de paleosuelos, aglomerados y coladas basálticas; la edad de las rocas más antiguas que se han fechado es de 18 Ma. Sobre las rocas anteriores se depositaron discordantemente un conjunto de rocas ácidas, formadas por ignimbritas, tobas y cenizas correspondientes a un ciclo volcánico de 1.05 a .84 Ma. Encima de ellas, se acumularon depósitos lacustres del Pleistoceno, asociados al colapso de la caldera de Los Azufres de edad cuaternaria. La Dacita San Andrés representa una fase volcánica importante, cuya edad es de 0.3 Ma, y es seguida de depósitos ignimbríticos de 0.28 Ma, e inyecciones riolíticas que forman estructuras dómicas de 0.14 Ma. La última etapa volcánica en la región es de composición básica con afloramientos de derrames al este y oeste del campo, y cenizas volcánicas en los alrededores (González, 2000).

Los estudios estructurales, muestran dos sistemas de fallas con inclinación casi vertical. El mayor tiene una dirección E-W y corta otros de menor importancia y más antiguos NE-SW. Las fallas E-W presentan desplazamiento lateral y se relacionan con el sistema regional activo "Acambay" de la FVT. Estas fallas se intersecan el borde sur de la caldera de Los Azufres y se caracterizan por su buena porosidad secundaria.

La zona de Los Azufres presenta una gran cantidad de manifestaciones hidrotermales, con varias descargas naturales que consisten únicamente de vapor, sin descargas de líquidos geotérmicos y una intensa caolinización superficial que se manifiesta claramente. El predominio del azufre nativo en las manifestaciones con algo de sulfatos y la caolinita definen una alteración hidrotermal de tipo argilización avanzada, y es una respuesta a la intensa interacción de roca-gases-acuífero colgado de los niveles someros del yacimiento (González, 2000).

Con base en su composición química, los manantiales ubicados dentro del campo presentan un carácter geoquímico sulfatado-ácido, lo que indica que se trata de aguas de origen meteórico calentados con vapor geotérmico, las temperaturas superficiales tienen un valor promedio de 36°C, mientras que en las áreas más profundas van de los 280 hasta los 340° C (Torres, et al., 1993).

IV.3.4 Tonatico, Estado de México

Tonatico se localiza en la parte sur del Estado de México, en las coordenadas geográficas 99° 40' longitud oeste, y 18° 48' de latitud norte (Figura IV.14); la mayoría del territorio se ubica a los 1,650 metros sobre el nivel del mar. El "Cerro de Tlacopan" es la parte más alta, con 2,125 msnm y "La Junta de los Ríos" es la parte más baja con 1,440 msnm (Vázquez, 1999).

Limita al norte y al poniente con el municipio de Ixtapan de la Sal, al sur con el municipio de Pilcaya, Gro., y al oriente con el municipio de Zumpahuacán. Una pequeña punta de tierra del municipio de Villa Guerrero, entra por el norte entre Zumpahuacán e Ixtapan de la Sal.

De acuerdo a la Secretaría de Planeación del Gobierno del Estado de México, el municipio cuenta con 91.72 km²

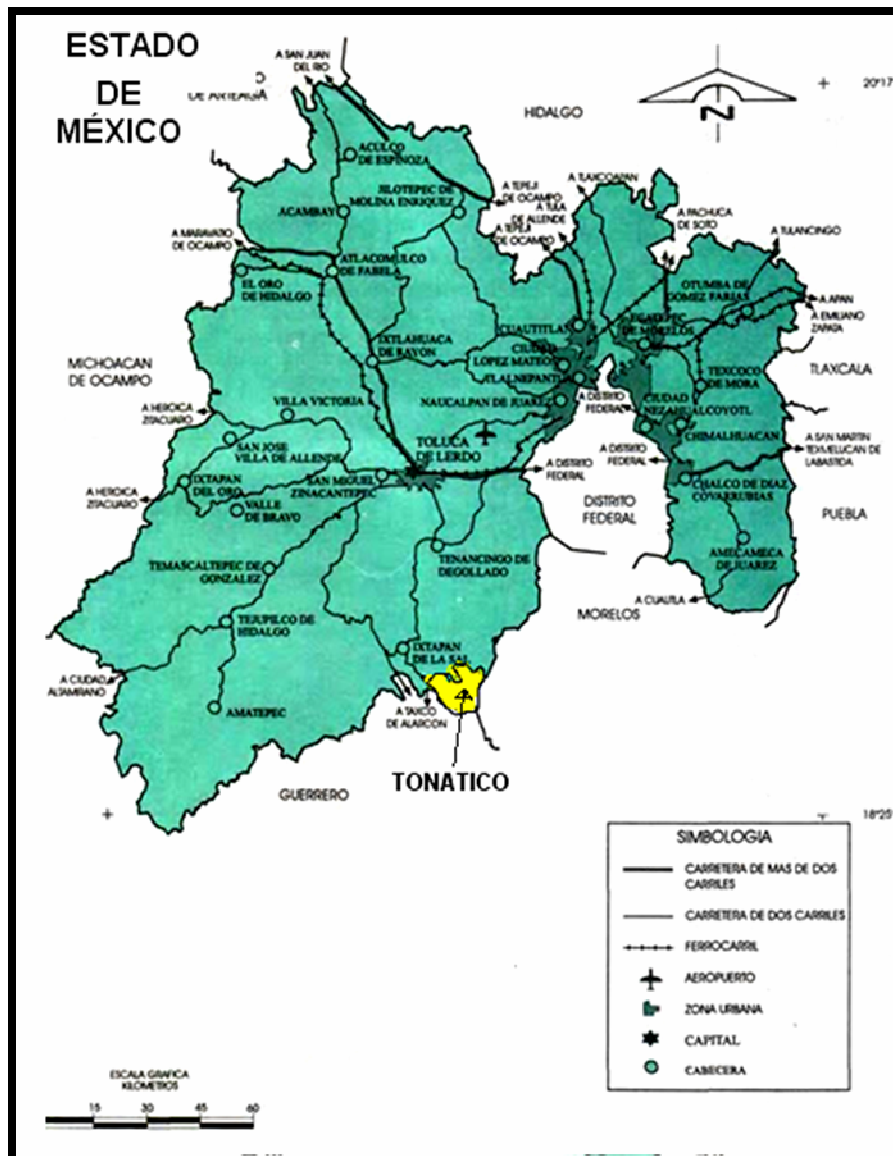


Figura IV.14 Localización del municipio de Tonalico, Estado de México (Tomada de INEGI, 1998).

En cuanto a la geología, las rocas más antiguas de la región son rocas metamórficas Paleozoicas, consisten en una potente sucesión de esquistos de clorita y esquistos sericíticos que muestran un metamorfismo de bajo grado; están abundantemente intrusionadas por cuerpos de rocas ígneas básicas y fueron afectadas por fuertes plegamientos (Vázquez, 1999).

Aunque las rocas metamórficas son características de los alrededores de Taxco, es posible que formen el basamento del valle de Ixtapan, donde se encuentra una cubierta de rocas más modernas que no permiten observar afloramientos de las rocas del basamento; esto se infiere debido a que las rocas metamórficas afloran en los cerros cercanos que limitan por el oeste el valle de Ixtapan de la Sal y quizá se encuentran en las profundidades de las barrancas Malinaltenango y Tlapala. Para el Mesozoico, se encuentran varias formaciones que afloran en la región, desde luego que las más antiguas, en algunas localidades siguen estando escasamente representadas. La formación más antigua se ubica en el Triásico y Jurásico corresponde con la Formación Roca Verde, se localiza en el área de afloramientos de los esquistos y sobrepuestos en discordancia con ellos; consiste en abundantes residuos de erosión de tobas y brechas cementadas por calcitas intercaladas con rocas efusivas, andesíticas y ligeramente metamorfozadas. Sobre esta secuencia se tiene una secuencia del Jurásico de calizas densas, dispuestas en estratos delgados a medianos, con abundantes capas intercaladas de pedernal (de 1 a 15 mm de espesor) que a veces constituyen más de la mitad del volumen de la roca que aflora en la región (Vázquez, 1999).

El Cretácico está representado por una sucesión de calizas y calizas dolomíticas de estratificación mediana a gruesa con estratos de 20 a 60 cm. de espesor. Contiene cantidades variables de pedernal en nódulos y lentes, sin llegar a formar capas continuas. El color de las calizas varía de una capa a otra entre el gris y el gris azulado; la formación descansa sobre una superficie fuertemente erosionada cubierta transgresivamente; su cima también fue erosionada antes del depósito de las formaciones suprayacentes. La presencia y espesor de esta formación es considerable, existiendo entre 900 a 400 m dependiendo del nivel de erosión (Vázquez, 1999).

Para el Cenozoico se encuentran gruesos depósitos de conglomerados continentales de variada composición que presentan echados hasta de 30 grados, se les conoce como "conglomerados rojos" (Vázquez, 1999).

También abundan los depósitos de lahar y lentes arenosos con estratificación cruzada, se le atribuye tentativamente una edad de fines del Oligoceno al Mioceno Inferior. Los cerros al sur de Zumpahuacán están constituidos parcialmente por andesitas del Plioceno, con sus respectivas tobas y conglomerados, así como abundantes efusiones basálticas del Pliopleistoceno (Vázquez, 1999).

Los depósitos aluviales y piroclásticos del Reciente cubren todo el centro del valle y forman una llanura construccional inclinada que se extiende desde el flanco meridional del Nevado hasta el borde sur del valle. Esta superficie está erosionada por lo que en cerros afloran las rocas más antiguas, como en los alrededores de Ixtapan y los cerros próximos a las grutas de La Estrella. En

esta formación es importante señalar los frecuentes depósitos de lahar y coladas de lava al sur de Tonatico (Vázquez, 1999).

Como una manifestación del vulcanismo, tenemos los manantiales hidrotermales de Ixtapan y Tonatico, que se utilizan en los famosos balnearios de estas poblaciones. Las aguas de estos manantiales se explotan rudimentariamente para la obtención de la sal o para el consumo local. La temperatura de estos manantiales oscila entre 35 y 40 grados y su alto contenido de boratos y anhídridos carbónicos demuestra su origen volcánico. Los canales que conducen estas aguas producen depósitos de travertino con tanta rapidez que sus bordes se elevan formando una pared por cuya parte superior continúa corriendo el canal a modo de acueducto. Su composición, es 85.2% carbonato de calcio, 16.6% carbonato de magnesio y 1.43% óxido de hierro y aluminio (Vázquez, 1999).

IV.3.5 Santa María Amajac, Hidalgo

Santa María Amajac, se ubica en un área comprendida en el Municipio de Atotonilco el Grande, Hidalgo.

En esta zona se cuenta con gran cantidad de arroyos, principalmente de carácter intermitente, los de carácter permanente se caracterizan por conducir caudales muy bajos, sobresaliendo el arroyo “Los baños de Amajac” el cual se forma a partir del manantial termal del mismo nombre (Beltrán y Luna, 1994).

En la margen noreste, sobre la mesa de Atotonilco, existen varias presas y bordo, tanto de tierra, como de mampostería; sus aguas son usadas para riego, en especial la presa la “Quilita” es un bordo de mampostería con obra de toma en su margen izquierda, sus aguas se clasifican como agresivas, con un total de sólidos disueltos de 326 p.p.m., siendo el constituyente mayor el CaCO_3 , con 173.0 p.p.m (Beltrán y Luna, 1994).

Las aguas del Río Amajac se clasifican como incrustantes, con un total de sólidos disueltos de 523.0 p.p.m, cuyo constituyente principal es el CaCO_3 con 340.5 p.p.m. Las aguas de este río, se utilizan para la agricultura, ganadería y uso doméstico. Sin embargo, sólo el 10% es aprovechable, debido a las condiciones orográficas existentes, donde predominan fuertes pendientes.

Respecto a las aguas del manantial “Los Baños Amajac”, se les clasifica como aguas incrustantes, con un total de sólidos disueltos de 2, 422 p.p.m., siendo los principales constituyentes SO_4 con 1,585.4 p.p.m. y CaCO_3 con 1, 537.5 p.p.m. y temperatura de 52°C. En el manantial se tienen obras de captación y las aguas son destinadas a uso recreativo en el balneario (Beltrán y Luna, 1994).

La Tabla IV.4 muestra los resultados obtenidos por Beltrán y Luna (1994), de observaciones y mediciones de algunos parámetros obtenidos de las aguas

termales de la localidad “Los Baños Amajac”, el manantial conocido como el “Bañito”, localizado al norte del Paso de Amajac y del manantial de agua fría de la localidad conocida como “Agua Nacida”, localizada sobre la margen sur del Río Amajac, aproximadamente a 5 Km al noreste del poblado de Sanctorum, Hidalgo.

1. Localidad “Los Baños Amajac”: En el manantial termal, se tienen tres veneros solos y dos grupos de éstos, cuyas características son las siguientes (Beltrán y Luna, 1994):

- El venero ubicado en la margen NW de la alberca grande que está al este de las instalaciones del balneario, tiene una temperatura de 50°C, presenta pH de 7.5 y su caudal es de 1.526 L/s.

- El venero ubicado en la capilla y su unión con otro no visible pero medible en un registro localizado en el patio principal de las instalaciones del balneario, al SW de la capilla; tiene una temperatura es de 51°C, el pH a ambos lados fue de 7.5 y el caudal total promedio de 0.689 L/s.

- El grupo de veneros ubicados al sur del arroyo los Baños: tiene una temperatura de 49°C, el pH de 7.5 y el caudal promedio de 0.425 L/s.

- El grupo de veneros que alimenta a la alberca “nueva” ubicada al oeste de las instalaciones principales del balneario presenta una temperatura de 50°C, el pH de 7.5 y el caudal total de 3.231 L/s.

- El venero ubicado en la localidad conocida como El Carrizal presenta una temperatura es de 47.5°C, el pH de 7.84 y el caudal promedio de 1.5 L/s.

El gasto total de los veneros que se están aprovechando para el balneario, corresponde a 5,872 L/s, lo que equivale a 352.331 L/min, 21,139.87 L/h y a 507,356.86 L/día. La temperatura promedio del agua es de 50°C y su pH de 7.5 (Beltrán y Luna, 1994).

Todos los veneros anteriormente descritos afloran a la superficie en las calizas de la formación El Abra.

2. Localidad “El Bañito”: Se localiza aproximadamente a 200 m al norte de la escuela “vieja” del poblado El Paso Amajac, su acceso se logra por la terracería que une al poblado de Atotonilco El Grande con Actopan. Dicho manantial se encuentra a 8 Km al noroeste de Atotonilco El Grande y a 2 km al oeste del balneario “Los Baños Amajac” (Beltrán y Luna, 1994).

La Temperatura medida al aire libre es de 39°C, el pH de 7.5 y el caudal aproximado de 1.5 L/s.

OBRA	Ca	Mg	Na	K	CaCO ₃	RAS	pH	CE	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	Cl	Total de Sólidos Disueltos*	Calidad de agua para riego ***	Agresividad del agua	Observaciones	
Río Amajac	73	37.9	22.5	1.9	340.5	0.53	8.4	0.58	218.9	158.6			10.6	523	C2-S1 INCRUSTANTE	Uso riego	
Bordo	43	15.7	17	9.7	173	0.56	8.1	0.39	73	146.4			21.3	326	C2-S1 AGRESIVA	De mampostería	
Manantial termal	385	138	125.3	8.6	1,537.50	1.39	7.9	2.81	1,585.40	152.5	2.5		24.8	2,422	C4-S1 INCRUSTANTE	Uso recreativo	
"Los baños Amajac"																	

* En miligramos por litro
 *** C2= Agua de salinidad media
 C4= Agua altamente salina
 S1= Agua baja en sodio

RAS=Relación de absorción de sodio
 CE= Conductividad eléctrica en milihoms por centímetro

Tabla IV. 4 Hidrología de Santa María Amajac (Tomada de Beltrán y Luna, 1994).

Aquí el manantial ha sido captado mediante una obra muy rústica que consiste de un bordo de tierra y roca que forma una tina al aire libre, de unos 3 m de diámetro y de 50 a 70 cm de profundidad, que la utilizan para bañarse principalmente los vecinos de los pueblos circunvecinos.

Al lado sur de la tina al aire libre, hay instalaciones particulares que cuentan con dos tinajas de concreto y que se ofrecen al público a un bajo costo.

V.4 CALEFACCIÓN

La calefacción es otro de los usos que desde hace tiempo se le ha dado, en pequeña escala a las aguas termales. El contenido energético de éstas puede ser extraído para elevar (o hacer descender) la temperatura de casas habitación o cualquier tipo de edificios a un costo mucho menor (económica y ecológicamente) del que se tendría si se utilizaran combustibles fósiles para producir energía eléctrica que serviría para producir calefacción. En Estados Unidos se efectuó un estudio acerca de los usos de la electricidad y se observó que cerca del 30% de consumo de esta, se destinaba a calefacción, porcentaje que se incrementa notablemente en invierno. Al transformar la energía geotérmica en eléctrica las pérdidas son de más de un 50% en comparación con lo que se obtendría si se usara directamente la energía geotérmica para calefacción (Prol, 1995).

Las aguas termales con temperaturas hasta de 50°C han sido utilizadas para calefacción, por lo que se ha establecido la posibilidad de usar para este fin campos semitermales y acuíferos de relativamente baja temperatura, los cuales además presentan generalmente la ventaja de una menor mineralización y menor poder corrosivo, facilitando así la utilización directa del contenido energético de las aguas. De esta forma, países a los que se les consideraba carentes de recursos geotérmicos (como Francia, Austria, Alemania, Inglaterra y otros), se encuentran actualmente en una etapa avanzada en la explotación de la energía de aguas termales de baja temperatura (Prol, 1995).

Sólo en pocos lugares, el agua caliente que se extrae de los pozos es suficientemente pura para poderla utilizar directamente en radiadores para calefacción. En general, el agua que se obtiene de los pozos contiene compuestos con propiedades corrosivas, por lo que para ser utilizadas es necesario emplear intercambiadores de calor, por medio de los cuales el contenido calorífico de las aguas termales es transferido a agua pura, que es la que va a transportar la energía a las casas y edificios para su calefacción.

El tema de la calefacción es especialmente importante en países con inviernos fríos (como lo son casi todos los países desarrollados de Europa y Norteamérica, entre otros).

En particular en Islandia, la calefacción es necesaria durante todo el año y no es sorprendente que éste haya sido el primer país que tuvo un sistema de calefacción geotérmica central para todo un distrito a principios de este siglo; actualmente más de dos tercios de la población total de Islandia gozan de calefacción con base en energía geotérmica, esto gracias a que es una gran isla volcánica que incluso en la actualidad tiene actividad magmática. En la capital islandesa, Reykjavik, el vapor y el agua caliente son bombeados a los edificios de la ciudad para calentar los interiores (Prol, 1995).

Otros países que también usan aguas termales en sus sistemas de calefacción son: Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda, Hungría, China, Checoslovaquia, Austria, la Unión Soviética y Francia. Especialmente en Francia se tienen planes muy ambiciosos de expandir los servicios de calefacción geotérmica a varias partes de ese país a partir del éxito económico y técnico que se ha obtenido en lugares como Melun y Meaux (Prol, 1995).

Adicionalmente, los fluidos geotérmicos también pueden ser empleados para enfriamiento y en sistemas de aire acondicionado que pueden funcionar como enfriadores en verano y como calefacción en invierno. Tales sistemas se encuentran ya en operación en el Hotel Internacional en Rotorua (Nueva Zelanda) y en un motel de Klamath Falls en Oregon (EUA). Además en Japón se tienen numerosos sistemas de aire acondicionado en pequeña escala para casas y edificios, los cuales utilizan fluidos geotérmicos para su consumo de energía.

Según Igor Leibar en la revista Rehabitar de la Asociación de Estudios Geobiológicos de España (2003), los equipos de calefacción y climatización a través de la geotermia están basados en una bomba de calor que es la adaptación a escala del mismo sistema usado en los refrigeradores comunes, dispone de un circuito refrigerante, un compresor, un condensador y un disipador que en invierno extrae calor del subsuelo, lo revierte en la vivienda, y en verano, mediante el cambio de sentido en la circulación de este calor, lo obtienen de la vivienda y lo depositan en el suelo, con lo que hay una aclimatación adecuada en cualquier parte del año. Esto supone una ventaja económica bastante sustancial, ya que sólo hace falta una instalación. La instalación geotérmica completa la forman dos bombas de calor, un sistema para captar e irradiar el calor colocados en el subsuelo y en la vivienda, que se conecta en ambos sentidos según la época del año.

La eficacia de la instalación mejora según sea de extrema la temperatura del ambiente, es decir, funciona en un mayor grado si hace mucho frío o mucho calor, porque como lo que más importancia tiene es la diferencia de temperatura entre el subsuelo y la superficie, las temperaturas extremas contribuyen a un mejor rendimiento de la instalación.

Existen básicamente tres sistemas de captación de energía geotérmica para calefacción, los cuales son (Leibar, 2003):

- CAPTADOR HORIZONTAL

El captador más utilizado en las viviendas unifamiliares o residenciales es sin ninguna duda el captador cerrado y "horizontal" (Figura IV.15).

Este tipo de captador es de uno o varios circuitos compuestos de una tubería de polipropileno reticulado y enterrado en el jardín a una profundidad de hasta 1 m de profundidad. Esta tubería encierra en su interior un líquido refrigerante apto y compatible con la naturaleza y también reconocido como respetuoso con la capa de ozono (Leibar, 2003).



Figura IV.15 Captador Horizontal (Tomado de Leibar, 2003).

- CAPTADOR VERTICAL CERRADO

La captación geotérmica más recomendable es la sonda a profundidad, también es la opción más cara pero debemos tener en cuenta que entre los 10 o 20 metros de profundidad la temperatura es constante durante todo el año, rondando entre los 7 y 14 grados, y por cada 100 metros de profundidad la temperatura aumenta 3°C, con lo cual el suministro de calor está siempre asegurado y el consumo del aparato será más bajo y regular (Figura IV.16).

Las sondas cerradas disponen de un líquido refrigerante en su interior, siempre es el mismo líquido en movimiento dentro de un circuito (Leibar, 2003).

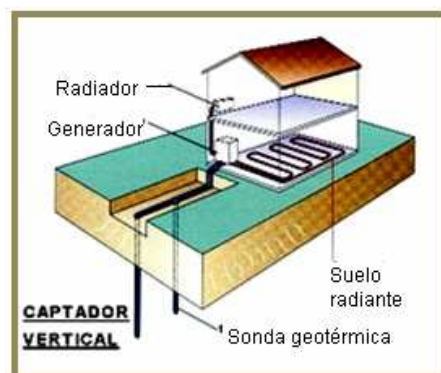


Figura IV.16 Captador vertical (Tomada de Leibar, 2003).

- CAPTADOR VERTICAL ABIERTO

Es una sonda clavada en posición vertical en la Tierra, que en la mayoría de los casos alcanza los 100 metros de profundidad (Figura IV.17). Estas sondas "abiertas" se utilizan donde se tiene conocimiento de una corriente subterránea de agua, aprovechando esta como líquido portador hasta la máquina, así una vez aprovechado su constante temperatura se devuelve al acuífero. El sistema de perforación utilizado es el mismo que para los pozos; si al perforar se encuentra alguna zona con agua, el rendimiento será mayor ya que es una buena conductora del calor.

En la ciudad de Reykiavik (Islandia) de por sí ya muy contaminada, desde que comenzaron a utilizar la energía geotérmica como primer recurso de calor, ha empezado a ser una de las ciudades más limpias del mundo. Los sistemas de calefacción de distritos geotérmicos bombean agua geotérmica hacia un intercambiador de calor, donde éste transfiere su calor al agua limpia de la ciudad que es conducida por tuberías a los edificios del distrito. Luego, un segundo intercambiador de calor transfiere el calor al sistema de calefacción del edificio. El agua geotérmica es inyectada de nuevo al pozo de reserva para ser recalentada y utilizada de nuevo (Leibar, 2003).



Figura IV.17 Captador vertical abierto (Tomada de Leibar, 2003).

V.5 AGRICULTURA Y GANADERÍA

Otro de los usos que se dan a los fluidos geotérmicos tiene que ver con la agricultura y la ganadería, que en general se usa para la calefacción de espacios. El uso de recursos geotérmicos para proveer el calor necesario en invernaderos es practicado en un gran número de países: Francia, Hungría, Islandia, Italia, Japón, Nueva Zelanda, Rumania, Estados Unidos, Rusia, India y algunos otros. Por ejemplo, en Islandia se cultivan unas 1 000 toneladas de vegetales en un área de 11 hectáreas utilizando fluidos geotérmicos, con lo que ese país se ahorra al año cerca de 20 000 toneladas métricas de petróleo, que

gastaría si los invernaderos utilizaran este combustible, además tienen frutas y verduras todo al año (Prol, 1995).

Ésta no es la única utilidad del agua termal en la agricultura, sino que también se le usa para calentar el suelo, lo cual se ha observado que aumenta el rendimiento de la tierra en 40 y hasta 60% dependiendo del cultivo de que se trate, y con el uso combinado de invernaderos y calentamiento del suelo se ayuda y acelera el crecimiento de las plantas en viveros y jardines botánicos, Cuando la temperatura del agua es lo suficientemente alta, también se le puede usar para esterilizar el suelo contra insectos y bacterias, ésta es una práctica común en Japón. Otros usos que se dan a los fluidos geotérmicos son por ejemplo en el secado de semillas (Prol, 1995).

En Islandia, en numerosos lugares los agricultores utilizan la energía geotérmica, realizan perforaciones hasta llegar a los 1000 metros de profundidad, que es donde el agua está en contacto con la roca volcánica. En la superficie, el agujero tiene un diámetro de 8 cm. La presión hace brotar el agua. Los cultivos de cebada y otros productos de primavera se secan con un menor costo gracias a la geotermia, ya que los agricultores islandeses obtienen el calor de las rocas volcánicas, la cebada se recoge a menudo con más del 30% de humedad y se seca al calor de las rocas volcánicas. Gracias a esto, no hay necesidad de rotar cultivos ya que todo el año puede haber producción de los productos que se quieran cultivar.

Por otro lado, los invernaderos, situados generalmente cerca de manantiales geotermales, tienen bajos costos de calefacción. En Selfoss, a 100 km de la capital Reykjavik, Islandia, un grupo de agricultores producen en invernaderos legumbres y flores cortadas explotando uno de los mejores manantiales. El agua tiene una temperatura superior a la de ebullición cuando emerge a la superficie. Se puede utilizar para esterilizar las vasijas y los invernaderos

Por otra parte, en Japón se ha comprobado que se obtiene un mayor rendimiento en la cría de aves cuando se cuenta con calefacción de las granjas en invierno. Además de la calefacción de establos y granjas, los fluidos termales pueden ser utilizados para la pasteurización de leche, incubación de pollos, la biodegradación de desechos orgánicos, el lavado y secado de lana, etcétera.

Los criaderos de peces son otra de las actividades que se han visto favorecidas con el uso de fluidos geotérmicos, utilizándose con bastante éxito en Islandia, Japón y Escocia (Prol, 1995).

V.6 USOS INDUSTRIALES

Al estudiar las posibilidades de utilizar directamente en la industria la energía contenida en los fluidos geotérmicos, se llegó a la conclusión de que una gran

cantidad de procesos industriales podían efectuarse utilizando las altas temperaturas de los fluidos geotérmicos disponibles, gracias a la tecnología actual y que muchos otros podían añadirse a esa lista si en el futuro se lograra obtener temperaturas más altas. En la actualidad no se cuenta con una lista completa de todas las industrias que utilizan directamente recursos geotérmicos como energético o bien como materia prima. Sin embargo, los ejemplos que se dan a continuación sirven para mostrar las posibilidades económicas del uso directo de los recursos geotérmicos en la industria (Prol, 1995):

1. Secado de productos agrícolas. Se utiliza en Estados Unidos, Nueva Zelanda, Islandia, entre otros. Se emplea el calor de las rocas volcánicas para secar diversos productos como los granos de varios cereales.
2. Procesado de alimentos. Es útil en el enlatado de alimentos en Estados Unidos y Filipinas.
3. Manufactura de textiles; teñido, lavado y secado de lana. En China y Nueva Zelanda.
4. Manufactura de papel. En Australia, Nueva Zelanda y China.
5. Fermentación. En Japón.
6. Extracción de sustancias útiles. Esto es a través de la evaporación de soluciones altamente concentradas, por ejemplo en Italia y China.
7. Producción de ácido sulfúrico. En Nueva Zelanda.
8. Producción de etanol. En Estados Unidos.
9. Agua pesada mediante un proceso con sulfuro de hidrógeno.
10. Extracción de sales por evaporación, evaporación en el refinado del azúcar. En Islandia.
11. Manufactura de cemento. En Islandia y China.
12. Facilidad de operaciones mineras en áreas de suelo permanentemente congelado. Agua caliente para la industria minera durante todo el año en climas fríos. Por ejemplo, Rusia.
13. Cura de madera. En Nueva Zelanda.
14. Manufactura de revestimientos. En Nueva Zelanda.

V.7 DEPÓSITOS MINERALES

Un depósito mineral es una concentración natural de minerales en la corteza terrestre. Estas zonas de mineralización pueden ser o no ser explotables

económicamente dependiendo de la concentración o grado de concentración del mineral o minerales que se pretenda aprovechar, del área y del volumen que abarquen (Prol, 1995).

Los depósitos minerales se pueden formar de muchas y variadas formas; por ejemplo, se pueden precipitar a partir de agua de mar o de lagos, o separarse de las aguas de los ríos que los arrastran hasta los lugares donde disminuye la fuerza de la corriente. También pueden concentrarse al separarse varios minerales con diferente temperatura de solidificación al enfriarse una intrusión magmática, o bien, pueden ser depositados a partir de una solución hidrotermal. En particular los dos últimos tipos de depósitos pueden considerarse como un resultado indirecto de la actividad generada por el calor contenido en el interior de la Tierra.

Muchos de los depósitos de minerales más importantes que se explotan en la actualidad en México y en el mundo, se han formado en relación a los sistemas geotérmicos (Prol, 1995). Existen también depósitos que se formaron por la sedimentación de material que fue erosionado, arrastrado y concentrado en algún lugar hasta formar una zona mineralizada, pero muchas veces éstos también derivaron de un depósito formado originalmente por circulación hidrotermal. Como ejemplo tenemos la erosión del depósito Mother Lode, que dio origen a las concentraciones de mineral en los ríos que provocaron la "fiebre del oro" en California (Prol, 1995).

Los sistemas volcánicos también generan depósitos minerales característicos, por ejemplo los de cromo. Estos depósitos se originan en la diferenciación que tiene lugar en una intrusión magmática al solidificarse ésta. Esta diferenciación hace que los metales más pesados se acumulen en el fondo, mientras que algunos elementos que presentan afinidad química con compuestos más ligeros, como los silicatos, tienden a concentrarse en las partes superiores y pueden ser arrastrados posteriormente por los fluidos termales que evolucionan a partir de las intrusiones magmáticas. También se sabe que las fumarolas en regiones volcánicas depositan algunos minerales que transportan en solución, siendo el azufre y el boro especialmente abundantes (Prol, 1995).

Los materiales termales forman extensos depósitos minerales con los productos de la alteración hidrotermal y en algunos de ellos se han encontrado concentraciones económicamente explotables de oro, plata, arsénico, antimonio, mercurio, talio, bario, uranio, plomo, zinc, cobre, tungsteno, molibdeno y flúor.

También se ha observado que en el fondo de los océanos se localizan acumulaciones importantes de nódulos polimetálicos. Estos nódulos son esférulas de varios centímetros de diámetro, formadas por varios metales en diferentes concentraciones, principalmente contienen manganeso y hierro

(respectivamente 16% y 15.6% en promedio), aunque también es económicamente importante su contenido de níquel (0.49%), cobalto (0.30%) y cobre (hasta 0.37%). Los mecanismos de formación de estos nódulos aún no se han desentrañado en su totalidad, pero se supone que tienen relación con la circulación de fluidos termales que es generada por la intrusión de material magmático en los sedimentos del fondo marino durante los procesos de formación de la corteza oceánica. Sin embargo, aún no se ha establecido si los nódulos se precipitan a partir del agua de mar o de materiales en los sedimentos (Prol, 1995).

En el capítulo IX del libro *“Geodinámica de México y minerales del mar”*, Aguayo y Trápaga, hablan sobre los nódulos polimetálicos: Estos nódulos se encuentran sobre el fondo marino, siendo los más enriquecidos en metales los que se forman entre los 4 000 y 5 000 m de profundidad, si bien hay otros que se forman en ambientes someros y aun en el continente durante la actividad volcánica. Las áreas con poca sedimentación evitan la dilución de los iones metálicos, y en las zonas cercanas a una dorsal oceánica activa, las fracturas permiten la circulación controlada de soluciones enriquecidas de iones metálicos, algunas de las cuales logran alcanzar las profundidades abisales. Las corrientes del fondo deben ser lo suficientemente oxigenadas para inducir la precipitación del níquel y del cobre, evitando a la vez la rápida formación de manganeso.

No obstante que se ha hablado mucho de los nódulos de manganeso como fuentes de metales estratégicos, no son éstos los únicos; también hay depósitos de sulfuros y costras cobaltíferas.

Los depósitos de sulfuros están asociados con ventilas hidrotermales o chimeneas hidrotermales en el fondo oceánico. En 1978, con el submarino francés *Cyana* se descubrieron depósitos de sulfuros polimetálicos asociados con chimeneas hidrotermales inactivas en la Dorsal o Cordillera Oceánica del Pacífico oriental y en la porción mexicana del sur del Golfo de California. En 1979, con el submarino estadounidense *Alvin* se localizaron sulfuros polimetálicos en chimeneas hidrotermales activas, en el mismo lugar explorado por el *Cyana* en la década de los ochenta. Aún más, en la Cuenca de Guaymas, en la porción central del mismo golfo, también hay depósitos de sulfuros polimetálicos. Los sulfuros contienen zinc, cobre, plomo, oro, plata y otros minerales también de interés económico, como cobalto, cadmio y cesio. Las chimeneas que expulsan partículas metalíferas se encuentran cerca del eje de las dorsales y tienen un espesor de sedimentos casi nulo. En otros casos, también están asociadas a fallas de transformación que cruzan transversalmente las dorsales oceánicas, como sucede al norte de la Cuenca Fiji, en Japón. Aquí se encontraron, según cálculos realizados, varios millones de toneladas de depósitos ricos en cobre y zinc, al igual que en la cordillera norte del Océano Atlántico, durante la expedición oceanográfica del proyecto

de colaboración franco-estadunidense *Famous* en 1978 (Aguayo y Trápaga, 1996).

Otros sulfuros también se encuentran en las crestas de las dorsales, en donde existe una tasa de sedimentación considerable debido a su cercanía con el borde continental, como en el Golfo de California y en Juan de Fuca en el Pacífico, situado en el mar adyacente a la parte continental noroccidental de Estados Unidos. Estos depósitos están enriquecidos con zinc, plomo y arsénico. En las montañas submarinas de origen volcánico situadas en el eje de las dorsales, como en el caso también del límite de la Juan de Fuca, hay volúmenes importantes de sulfuros y presencia de metales como plata y oro, además de zinc. En las cuencas adyacentes a los arcos volcánicos como las Marianas, las Fiji y Lau, en el Pacífico, se colectaron en 1988 sedimentos con polimetálicos asociados con hidrotermalismo de temperaturas mayores a los 400°C, enriquecidos con sulfato de bario (Aguayo y Trápaga, 1996). En los arcos volcánicos separados del continente por el mar, como en la isla de Okinawa, los sulfuros están caracterizados por sus altas concentraciones de cobre, plata y oro.

Se ha encontrado que las zonas de la corteza oceánica altamente activas son zonas de debilidad en las que se expulsan metales de alto valor económico, con gran demanda y en volúmenes considerables, por lo que resultan atractivos como reserva potencial para este siglo.

Los manantiales termales no son más que la expresión superficial de la intensa actividad que tiene lugar a profundidad en un sistema geotérmico, pero representan una oportunidad de observar un depósito mineral en proceso de formación (Prol, 1995). Las grandes fluctuaciones de temperatura y presión que resultan de esta actividad a profundidad están directamente relacionadas con procesos químicos que tienen como resultado la mineralización de algunas zonas del sistema (Figura IV.18).

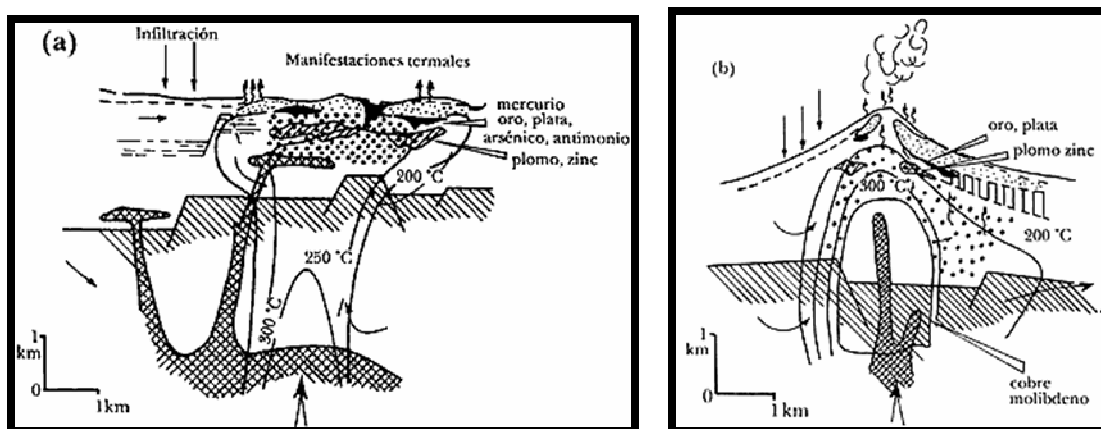


Figura IV.18 Localización de las posibles zonas de mineralización: (a) en un sistema hidrotermal y (b) en un sistema relacionado con actividad volcánica (Modificada de Prol, 1995).

La identificación de las diferentes partes de un sistema hidrotermal fósil es de gran importancia en la exploración de este tipo de depósitos minerales, ya que por ejemplo la depositación de oro ocurre preferencialmente en la frontera entre dos zonas del sistema con diferente tipo de alteración hidrotermal. De esta forma, la correlación de sistemas hidrotermales fósiles con sistemas activos facilita la localización de sitios de mineralización y por lo tanto aumenta la eficiencia de los trabajos de exploración (Prol, 1995).

Se ha demostrado que muchos depósitos minerales tuvieron su origen en la precipitación de componentes de fluidos termales. Por esta razón, el estudio de los procesos que tienen lugar en sistemas geotérmicos activos, nos sirve para comprender la evolución de sistemas fósiles que ahora podemos reconocer como depósitos minerales epitermales. El conocimiento de los patrones de alteración y depositación hidrotermal en un sistema activo ayuda a establecer la morfología de los sistemas fósiles y a determinar el tipo y la posible localización de las zonas de mineralización (Prol, 1995).

Entre las zonas con una mayor riqueza con respecto a este tipo de depósitos se encuentra la región que rodea al Pacífico, dentro de la cual queda comprendida la Sierra Madre Occidental, las zonas mineras de Baja California y la parte central y Suroeste de México. A continuación, se citan dos ejemplos de este tipo de yacimientos hidrotermales.

V.7.1 Caopas, Zacatecas

La región de Caopas se localiza en la porción norte del Estado de Zacatecas, limitando prácticamente con el estado de Coahuila. Predominan en su mayoría rocas metamórficas miloníticas de las cuales su protolito es la Fm Nazas de edad Jurásico Inferior la cual se caracteriza por una secuencia de rocas volcánicas de composición ácida a intermedia, observándose derrames y eventos piroclásticos alcanzando un espesor de hasta 1000 m (Menguelle, 2007).

Estas rocas muestran una disminución progresiva de la deformación hacia zonas más superficiales. Suprayaciendo discordantemente a éstas rocas se observan un conglomerado polimíctico y una alternancia de calizas, calizas arcillosas y lutitas cuya edad fluctúa del Jurásico Superior al Cretácico Superior. Es en éstas donde se observan evidencias de mineralización de metales preciosos (Au y Ag) y básicos (Pb, Zn y Cu), además de alteraciones hidrotermales de dimensiones considerables las cuales están constituidas mineralógicamente por barita, caolín, pirofilita, sericita y talco primordialmente, los cuales constituyen una alteración argílica asociada a un probable yacimiento epitermal de metales preciosos, ya que estos han sido detectados de manera no económica. La fuente de hidrotermalismo en toda la región estudiada es un cuerpo ígneo intrusivo el cual se ha ido diferenciando en dirección noreste, lo cual se evidencia por la presencia de dos pequeños

apófisis de composición granítica y monzonítica hasta llegar a un tronco granodiorítico; ésta diferenciación está asociada a un zoneamiento mineralógico y geoquímico en las zonas de mineralización con relación a los metales mencionados (Menguelle, 2007).

La alteración hidrotermal definida regionalmente está acompañada invariablemente por una intensa silicificación y carbonatación presentándose vetas muy delgadas de cuarzo y calcita, siendo en algunas localidades importantes la presencia de la especularita. En las alteraciones hidrotermales en que no se observan sulfuros o cualquier otro metal, geoquímicamente se han detectado elementos asociados a fenómenos de hidrotermalismo puro, en conjunto con la barita, caolinita, pirofilita, talco y cuarzo ayudan a definir el probable modelo del yacimiento. Es importante mencionar que se han observado afloramientos en los que la paragénesis indica la probable presencia de dos eventos de mineralización, por lo que se cree que existe un control estructural esencial para tal fenómeno, además del observado regionalmente en otras localidades.

Ya que las rocas metamórficas expuestas en ésta región muestran fracturamiento, clivaje y foliación de manera penetrante, se piensa que puede estar actuando como una unidad litológicamente receptora de fluidos hidrotermales enriquecidos en metales de valor económico, permitiendo en su desarrollo estructuras tipo vetas, cuerpos estratiformes y stockwork de sulfuros, asociados a la mineralización manifestada en la superficie (Menguelle, 2007).

V.7.2 Naica, Chihuahua

Naica es un típico pueblo minero ubicado en el norte de México, en el estado de Chihuahua, a 112 km al sur este de la capital homónima y a 35 km de la ciudad de Delicias, en el municipio de Saucillo

La mina de Naica, es uno de los depósitos de plomo más importantes del mundo. El área está formada por una estructura en domo de orientación NW–SE de 12 km de largo por 7 km de ancho, localizada al Norte de la Sierra de Naica que resalta en una extensa llanura aluvial (García, et al., 2007). El distrito minero de Naica está constituido totalmente por rocas sedimentarias: una secuencia de carbonatos de edad Albiense con algunas intercalaciones de lutitas. Esta secuencia se dispone sobre otra evaporítica de edad Aptiense que se puede encontrar en la región, pero no en el distrito minero.

Las rocas sedimentarias fueron intrusionadas por diques de rocas ácidas de edad terciaria. A 4 km al sur de la mina de Naica, estudios magnetométricos han puesto de manifiesto la presencia de una intrusión ígnea a profundidades entre 2 y 5 km. La circulación del fluido hidrotermal asociado con los diques terciarios dio lugar a los depósitos de Ag-Pb-Zn. Estos depósitos presentan morfologías en manto y chimenea, desarrollados tanto en los diques como en

los carbonatos, que presentan una intensa alteración a calcosilicatos. Un conjunto de fallas actúa como principal control estructural de la mineralización, siendo las más importantes Gibraltar, Montaña y Naica. La paragénesis mineral comprende piritita-pirrotina, esfalerita, galena y calcopiritita; se formó a partir de una salmuera hipersalina de alta temperatura, de acuerdo con los datos de inclusiones fluidas (García, et al., 2007). Durante el último estadio hidrotermal, el ácido sulfúrico procedente de la oxidación de los sulfuros preexistentes reaccionó con los carbonatos generando aguas sulfatadas cálcicas que precipitaron anhidrita.

La anhidrita aparece en Naica a niveles por debajo de -240 m. Finalmente, venas tardías de cuarzo-calcita-anhidrita cortan la mineralización metálica.

Desde los primeros años del siglo XX, la excavación de nuevas galerías y túneles en la mina de Naica ha llevado ocasionalmente al descubrimiento de cavidades y cavernas que contienen cristales métricos de selenita, la variedad cristalina transparente del yeso. Las cavernas siempre se localizan cerca de fracturas y sus paredes están cubiertas por una costra de calcita y celestina con cantidades menores de óxidos de hierro, montmorillonita, clorita e illita.

En el 2000 varias cavernas fueron descubiertas en el nivel -290 m en fallas secundarias asociadas con la mineralización. Una de estas cavernas, la Cueva de los Cristales, contiene cristales de selenita de hasta 11 m de longitud y 1 m de grosor, dimensiones muy superiores a cualquier cristal de yeso hasta ahora descubierto (García, et al., 2007).

IV.8 OTROS POSIBLES USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

En la época actual son ya muchos los usos industriales que tiene la energía geotérmica, sin embargo el horizonte de su aplicación es todavía más amplio.

La extracción de energía en zonas fuera de los sistemas hidrotermales se encuentra aún en la etapa de investigación. Especialmente en Estados Unidos e Inglaterra se están llevando a cabo experimentos para crear campos geotérmicos artificiales en zonas llamadas de "roca-seca". En estas zonas se cuenta con un gradiente más alto que el normal pero la ausencia de permeabilidad en las rocas hace que no se tenga un sistema de circulación hidrotermal, a pesar de contar con una fuente de calor para ello. En estos casos se ha tratado de inducir el fracturamiento de las capas de rocas de 3 a 5 kilómetros de profundidad por medio de explosiones y fracturamiento hidráulico (Dickson y Fanelli, 2004).

Incluso se ha pensado en hacer detonar bombas nucleares en el fondo de pozos profundos. Estas bombas, además de fracturar las rocas circundantes, proveerían una fuente de calor adicional generado por el decaimiento de los desechos radiactivos producidos por la explosión, con la ventaja de que la

peligrosidad de la difusión de estos desechos sería evitada, ya que quedarían encerrados en una masa de roca fundida que cristalizaría, formando así un recipiente seguro. Por supuesto, la falta de seguridad de que todo suceda perfectamente como se planea ha frenado la realización de estos experimentos.

En los proyectos de *Rocas Secas Calientes* (RSC) de los cuales se experimentó por primera vez, en 1970, en Los Álamos, Nuevo México, USA, el fluido y el yacimiento se lograron artificialmente. En este caso, se bombea agua a alta presión a través de pozos hasta un cuerpo de rocas calientes y compactas, causando así su *fracturamiento hidráulico*. El agua circula en estas fracturas artificiales, extrayendo el calor de la roca circundante que actúa como un reservorio natural; el cual es posteriormente alcanzado por un segundo pozo que se emplea para extraer el agua calentada. Por lo tanto, el sistema consiste en (Dickson y Fanelli, 2004):

- (i) El pozo empleado para fracturamiento hidráulico a través del cual se inyecta agua fría.
- (ii) El yacimiento artificial
- (iii) El pozo utilizado para extraer el agua caliente.

Todo el sistema, conjuntamente con la planta de utilización en la superficie del terreno, puede conformar un circuito cerrado (Garnish, 1987) (Figura IV.19).

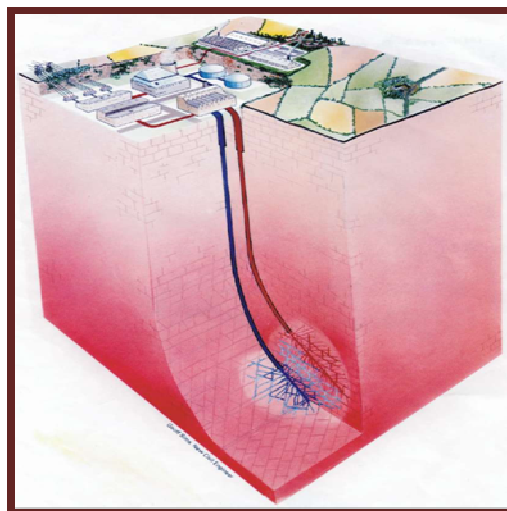


Figura IV.19 Esquema de un sistema de roca seca caliente a escala comercial (Tomada de Dickson y Fanelli, 2004).

El proyecto Los Álamos fue el precursor de proyectos similares en Australia, Francia, Alemania, Japón y el Reino Unido. Después de un período de relativo

abandono, estos proyectos han sido reimpulsados a partir del descubrimiento de que en profundidad las rocas tienen cierto grado de fracturamiento natural, y además, que las metodologías y tecnologías empleadas dependerían de las condiciones geológicas locales. Las investigaciones más avanzadas en RSC han sido llevadas a cabo en Japón y mediante el proyecto Europeo en Alsacia (Francia) (Dickson y Fanelli, 2004).

En Japón han sido emprendidos varios proyectos desde la década de 1980 (en Hijiori, Ogachi y Yunomori), que han sido fuertemente financiados por el gobierno y la industria japonesa, teniendo como consecuencia, interesantes resultados tanto desde el punto de vista científico como el industrial.

El proyecto Europeo de RSC por otra parte, ha sido programado en varias fases, incluyendo la perforación de 2 pozos, uno de los cuales ha alcanzado 5.060 metros de profundidad, los resultados han sido muy promisorios ya que se han obtenido de sus estudios geofísicos y pruebas hidráulicas gran cantidad de información que ha contribuido al conocimiento científico; el proyecto europeo, por ahora, parece ser el más exitoso (Tenzer, 2001).

Las investigaciones acerca del uso de los sistemas RSC han tenido gran impulso especialmente en Camborne School of mines en Cornwall (Inglaterra), en Los Alamos Scientific Laboratory de la universidad de California y en Sandia National Laboratories en Nuevo México (Estado Unidos).

Además de los usos industriales que ya se mencionaron anteriormente, y que son los que en la actualidad ya tienen una aplicación comercial, existen muchos planes para la utilización directa de la energía geotérmica que por diversas razones (económicas y tecnológicas) no se han llevado aún a la práctica.

Un uso más intenso y extenso de la geotermia, puede ayudar a resolver la problemática existente en el mundo en lo que respecta al uso de energía y además colaborar en el desarrollo sustentable, aunque bien es cierto que por ahora la geotermia sólo satisface una mínima parte del consumo energético mundial y que el conjunto de energías nuevas y renovables sólo aportan del orden del 1% del total de la energía producida en el mundo, no obstante, en regiones donde pueda desarrollarse su potencial, no cabe duda, de que su uso seguirá en aumento.

CAPÍTULO V ZONAS Y YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS EN MÉXICO

V.1 CONSIDERACIONES GENERALES

El tema de los combustibles utilizados para la generación de energía eléctrica cobra cada vez mayor importancia por las tendencias mundiales hacia una mayor demanda, eficiencia tecnológica y el cuidado del medio ambiente, además de que las reservas de combustibles fósiles son finitas; además, el consumo de estos combustibles tiene costos ocultos, como el del impacto ambiental. En tiempos de paz, la producción y el consumo de energía causan más daño al medio ambiente que cualquier otra actividad realizada por el hombre. México se encuentra inmerso en este dinamismo internacional que se está desarrollando en el sector eléctrico, sobre todo porque la demanda está incrementándose.

Durante el periodo 1994-2008, en *Perspectiva del sector eléctrico 2005-2014*, el consumo mundial de energía eléctrica creció a una tasa promedio de 3.0% anual, la cual para cada año, significó un consumo promedio de 14,768 TWh (SENER, 2008).

La tendencia del consumo de energía eléctrica en los países industrializados indica crecimientos moderados debido a que sus mercados cuentan con una mejor utilización de la energía respecto al resto de las regiones en desarrollo.

Adicionalmente, los crecimientos en el consumo de energía eléctrica registrados en Norteamérica y Europa Occidental han sido del orden del 2.0% y 2.3% respectivamente, los cuales se ubican por debajo de la tasa mundial (SENER, 2008).

En el caso particular de Norteamérica, los consumos de Canadá y Estados Unidos de América (EUA) de 1994-2008 se ubicaron en 1.4% y 1.9%, mientras que México presenta la mayor tasa de consumo de energía eléctrica (ventas internas y autoabastecimiento), con 5.7% durante dicho periodo (SENER, 2008).

La capacidad mundial de generación de energía eléctrica mundial del 2003 al 2008 ascendió a 3,626 GW cada año (Secretaría de Energía, 2008), lo cual significó un incremento de 3.3% cada año. En general, las centrales termoeléctricas convencionales mantienen la mayor participación en la generación de energía eléctrica, a excepción de algunos países como son Francia, donde la energía nuclear predomina, o Canadá donde la mayor participación es de centrales hidroeléctricas.

A nivel mundial, la principal tecnología utilizada para generar energía eléctrica es la termoeléctrica convencional, misma que está presente en países

desarrollados y en desarrollo. Por otro lado, la energía nuclear predomina en Europa Occidental y Asia industrializada en 19% y 16%, respectivamente (Secretaría de Energía, 2008). Las mayores capacidades para generar energía eléctrica se encuentran en EUA, China, Japón y Rusia.

La demanda mundial de energía eléctrica se estima que crecerá a una tasa anual de 2.9% durante el horizonte 2009-2015. El crecimiento estimado mundial es impulsado principalmente por los países en transición y en desarrollo (SENER, 2008).

En lo que respecta a la demanda de energía eléctrica en los países industrializados, su crecimiento estimado es de 1.4% debido principalmente a que en estos países los sectores eléctricos son maduros, con equipos de eficiencias altas, por lo que sus crecimientos esperados son moderados.

Los países en desarrollo muestran un mayor incremento en su demanda estimada de electricidad, y están siendo impulsados fuertemente por un mayor crecimiento económico y poblacional.

Las estimaciones pronostican para los países en desarrollo un crecimiento de 5.1% para 2009-2015 (Secretaría de Energía, 2008). De acuerdo a estos supuestos, estos países esperarán un mayor crecimiento en la demanda de energía eléctrica, por lo que han iniciado programas de reestructuración, promoción de inversiones y de electrificación rural.

En Asia, su tasa estimada de crecimiento de demanda eléctrica también asciende a 5.1% debido al gran dinamismo de esta zona. Por los altos aumentos en la demanda eléctrica en China y a que el 75% del consumo de energía eléctrica lo utiliza en el sector manufacturero y en la industria pesada, se estima que este país alcanzará un consumo aproximado de 570 GW para el año 2010 (SENER, 2008).

La mayor tasa de crecimiento de la demanda de electricidad se estimó para la región de países en desarrollo. La capacidad de energía eléctrica de los países industrializados presenta un crecimiento ligero debido a la estabilidad de sus mercados y sus tasas moderadas de demanda estimada para los próximos años.

El sistema energético mexicano se basa, fundamentalmente, en los hidrocarburos. El sector productor de hidrocarburos había tenido un acelerado desarrollo en los últimos cincuenta años, sin embargo, México, de ser en 1988 el cuarto productor y exportador más importante de petróleo crudo a nivel mundial, ha pasado a ser el sexto productor y el décimo exportador a nivel mundial como lo muestran las Tablas V.1 y V.2, con reservas que no garantizan sus requerimientos energéticos a largo plazo.

Lugar	País productor	Producción(Mdb)
1	Arabia Saudita	10,665
2	Rusia	9,677
3	Estados Unidos	8,330
4	Iran	4,148
5	China	3,845
6	México	3,707
7	Canadá	3,288
8	Emiratos Árabes	2,945
9	Venezuela	2,803
10	Noruega	2,786
11	Kuwait	2,675
12	Nigeria	2,443
13	Brasil	2,166
14	Algeria	2,122
15	Irak	2,008

Tabla V.1 Principales países productores de petróleo a nivel mundial (Mdb; millones de barriles). Fuente: Energy Information Administration, 2008.

Lugar	País exportador	Mdb
1	Arabia Saudita	8,525
2	Rusia	6,816
3	Emiratos Árabes	2,564
4	Noruega	2,551
5	Irán	2,462
6	Kuwait	2,342
7	Venezuela	2,183
8	Nigeria	2,131
9	Algeria	1,842
10	México	1,710
11	Libia	1,530
12	Irak	1,438
13	Angola	1,379
14	Kazakhstan	1,145
15	Qatar	1,032

Tabla V.2 Países exportadores de Petróleo crudo a Nivel Mundial (millones de barriles), Fuente: Energy Information Administration, 2008. Las cifras corresponden al 31 de diciembre de 2006.

De acuerdo a todo lo descrito anteriormente, es posible entender que el panorama energético del país se torna un tanto difícil, sobre todo si se

considera la disminución de reservas de hidrocarburos y la alta demanda de energía eléctrica que se tiene, por ser un país en desarrollo; es conveniente que se reduzca la dependencia que se tiene de los combustibles fósiles, esto es posible con un desarrollo sustentable en el que se aprovechen más otros recursos energéticos, como la geotermia, el viento y la energía solar.

En las Tablas V.3 y V.4, se observa que el uso de algunas de estas fuentes alternas de energía, ya es un hecho en el país, sin embargo, aún es muy limitado a pesar de que dichos recursos además de ser endógenos, tienen la ventaja de producir mucha menor contaminación que los combustibles fósiles. De estas fuentes de energía, la geotérmica es la de mayor madurez, tanto tecnológica como económicamente (Torres, et al., 1993).

Tipo de Generación	Capacidad efectiva en MW	Porcentaje
Termoeléctrica	22,404.69	45%
Hidroeléctrica	11,054.90	22%
Carboeléctrica	2,600.00	5%
Geotermoeléctrica	964.50	2%
Eoloeléctrica	85.25	0%
Nucleoeléctrica	1,364.88	3%
Termoeléctrica (Productores Independientes)	11,456.90	23%
Total	49,931.12	100%

Tabla V.3 Capacidad efectiva instalada por tipo de generación al mes de abril de 2009 (Fuente: estadísticas Pemex 2009).

Tipo de Generación	Porcentaje
Geotermia	3.16%
Carbón	7.74%
Nuclear	4.78%
Eólica	0.13%
Productores Independientes	34.01%
Hidráulica	13.47%
Hidrocarburos	36.71%

Tabla V.4 Generación por fuente de energía (Tomada de Estadísticas Pemex 2009.)

Para aprovechar más esos recursos, se necesita investigación y puesta en marcha de programas de fuentes alternas de energía como las citadas en las tablas anteriores o la que se puede obtener de hidrocarburos no convencionales (gas en lutitas, gas del carbón, hidratos de metano, etc.), es urgente adelantar estudios que conduzcan al planteamiento de un cambio estructural energético a corto y mediano plazos, encausado hacia la diversificación energética. Cabe mencionar que de lo que ocurra en el sector energético nacional, dependerá, en gran medida, lo que suceda en los demás sectores de la economía de México.

La dotación de energía eléctrica a comunidades aisladas y sitios remotos en el interior de la República Mexicana, constituye uno de los problemas más

difíciles de resolver y trae consigo otros problemas relacionados con el desarrollo económico y social de muchas comunidades. Una de las causas por las que no se resuelven tales situaciones, es el aislamiento físico de las poblaciones, que carecen de infraestructura, y poco desarrollo económico, resulta, a su vez, en una reducida demanda de energía y el consiguiente problema de un círculo vicioso: no- desarrollo no-industria no-demanda no-dotación de energía no- desarrollo... Como hecho paradójico, las dificultades de acceso y de infraestructura en este tipo de comunidades se deriva entre otros, de la interacción de fenómenos naturales sobre una topografía agreste, de fenómenos como exceso de precipitación pluvial, de radiación solar, de viento o de vulcanismo; por mencionar sólo algunos. Fenómenos como los descritos son precisamente los que constituyen las fuentes alternas de energía que han sido más estudiadas en los últimos años: microhidroelectricidad, energía de la biomasa, energía solar, energía eólica y energía geotérmica, que adecuadamente encausadas, constituyen alternativas de solución específica para comunidades marginadas y no marginadas (Torres, et al., 1993).

No obstante las innumerables investigaciones que se realizan en diferentes países sobre fuentes alternas de energía, especialmente en biomasa, solar y eólica, ninguna de ellas ha probado su aplicabilidad para la dotación continua de suficiente volumen de energía, que permita la electrificación de comunidades completas y pequeños centros industriales. La energía geotérmica se perfila, tanto por criterios técnicos como de viabilidad económica, como la fuente de energía en cantidades suficientes para el desarrollo de sitios como los mencionados. Los países del Cinturón del Fuego (el que bordea la cuenca del Pacífico: Asia, Oceanía y todo el Continente Americano), disponen abundantemente de energía geotérmica y son los candidatos naturales a beneficiarse con este tipo de energía (Torres, et al., 1993).

La experiencia mundial apunta a que las regiones con mayor posibilidad de éxito en el desarrollo geotérmico (que disponen del recurso), son aquellas en donde existen demandas pequeñas de energía eléctrica, donde existen núcleos reducidos de población, dificultades de acceso para las redes de interconexión eléctrica nacional y relativo aislamiento con respecto a otros centros de consumo energético. Países como Filipinas, El Salvador y Kenia, basan buena parte de su producción de energía eléctrica en fuentes geotérmicas; por su parte, en países desarrollados como Estados Unidos, la geotermoelectricidad representa solamente el 0.3% de su producción total (Torres, et al., 1993).

V.2 ZONAS GEOTÉRMICAS EN MÉXICO

México cuenta con abundantes recursos geotérmicos debido a sus particulares características geológico-estructurales.

A continuación, se presentan datos específicos sobre la distribución de manifestaciones de energía geotérmica en México, la información que se presenta, fue tomada básicamente de dos trabajos de investigación sobre el tema; el primero es "*Geotermia en México*" de Torres, et al., 1993 del PROGRAMA UNIVERSITARIO DE ENERGÍA.UNAM, y el segundo es

“Estimacion del Recurso y Prospectiva Tecnológica de la Geotermia en México” de Iglesias, et al., 2005, del INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS.

Una base de datos elaborada por Iglesias, et al. (2005), reporta 2,332 manifestaciones geotérmicas distribuidas en 27 de los 32 Estados Mexicanos, mismos que se muestran en la Figura V.1.



Figura V.1 Distribución geográfica de las manifestaciones geotérmicas Mexicanas (Adaptada de Iglesias, et al., 2005).

Realizando un análisis de la distribución de las manifestaciones geotermiales en dirección Este-Oeste, en la República Mexicana, se identifican cinco agrupamientos con respecto a la longitud y latitud geográficas (Torres et al., 1993).

Baja California Norte. Contiene cerca del tres por ciento de las manifestaciones termales conocidas, la mayoría relacionadas al Sistema de Fallas de San Andrés y al vulcanismo asociado (Torres, et al., 1993).

Noroccidente de México. Comprende las manifestaciones alojadas en la Sierra Madre Occidental y las del estado de Chihuahua. Constituyen más del 13% de las manifestaciones geotermiales estudiadas. La distribución geográfica de estas anomalías definen alineamientos paralelos a la línea de costa, es decir, en dirección NW-SE. La mayoría de tales alineamientos coinciden con

fallas conocidas y cartografiadas en diferentes trabajos publicados (Torres, et al., 1993).

Faja Volcánica Transmexicana. Es la región con el mayor número de localidades termales registradas, conteniendo cerca del 79% de los puntos estudiados. La distribución de focos geotermales en esta zona presenta tres subregiones que corresponden al agrupamiento sur (estado de Michoacán) alojadas en todas las depresiones tectónicas. La segunda región corresponde al sector central, distribuida a lo largo del Cinturón Volcánico, en donde los focos termales se asocian a las depresiones tectónicas del occidente de la Faja. La tercera región, que abarca el este y centro de la Faja Volcánica Transmexicana donde las anomalías termales se asocian a fracturamientos Norte- Sur y Este-Oeste, y se les encuentra, indistintamente, en diferentes estructuras volcánicas, incluyendo calderas, volcanes monogenéticos y estratovolcanes (Torres, et al., 1993).

Costa del Pacífico Sur. Formada por las manifestaciones termales ubicadas en los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas, constituyen más del dos por ciento de las localidades conocidas. Existen agrupamientos de datos en las regiones de los volcanes del Chichón y Tacaná, además en las costas del estado de Guerrero (Torres, et al., 1993).

Noreste. Las manifestaciones termales que se ubican en la región nororiental de México (estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas), constituyen aproximadamente el tres por ciento de las manifestaciones geotermales encontradas (Torres, et al., 1993).

La distribución de las diversas manifestaciones termales, tiene una estrecha relación con la tectónica reciente de México, ya que la República mexicana se encuentra en la actualidad bajo la influencia de las placas de Norteamérica, del Pacífico, de Cocos, de Rivera y del Caribe. Si observamos la distribución geográfica de las localidades geotermales de México, surgen, inmediatamente, una serie de agrupamientos y alineamientos que coinciden con el límite algunos elementos tectónicos conocidos. En algunas regiones, la densidad de datos y el arreglo de éstos no coinciden con estructuras detectadas con anterioridad, lo que sugiere la presencia de elementos tectónicos cuya existencia podría asociarse a otras etapas de deformación (Torres, et al., 1993).

La posibilidad de detectar los límites de los elementos tectónicos recientes, a través de información geotérmica, es congruente con la naturaleza de los procesos geodinámicos que producen a aquélla. Una de las evidencias de la presencia de un límite tectónico, es la aparición de gradientes elevados y los cambios en las propiedades físicas y químicas de sus constituyentes, así como de cambios litoestratigráficos y estructurales. En consecuencia, variaciones en el valor de propiedades como flujo de calor, sismicidad, anomalía de Bouguer y composición química de fluidos termales, entre otras, son fieles reflejos de cambios contrastantes en la composición global del subsuelo (Torres, et al., 1993).

Tomando como base tectónica la Carta Tectónica de México (Padilla, et al., 1989), los regímenes tectónicos en donde se han desarrollado manifestaciones geotermales actuales incluyen los siguientes:

- Cresta Oceánica Activa del golfo de California y Sistema de Fallas San Andrés.
- Sistema de Fallas de la Sierra Madre Occidental
- Faja Volcánica Transmexicana
- Cadena Volcánica Centroamericana
- Sistema de Fallas Motahua-Polochic
- Arco Magmático Peripacífico del Sur de México
- Sierra Madre Oriental
- Planicie Costera del Golfo de México
- Rift del Río Bravo

Con base en su ambiente tectónico estructural y a su ubicación, se han propuesto Provincias Geotérmicas (Torres, et al., 1993) que se muestran en la Figura V.2.

Las características geológicas y geotermales de cada elemento se describen a continuación:

V.2.1 Cresta Oceánica Activa del golfo de California y Sistema de Fallas San Andrés.

La cresta oceánica de expansión activa en el Golfo de California y el Sistema de Fallas San Andrés, pertenece a la Cresta del Pacífico Oriental, límite entre las placas del Pacífico y de Norteamérica. En esta zona, la Cresta del Pacífico ha chocado contra el continente, separando la península de Baja California de las costas actuales de México. El proceso se desarrolla mediante la creación de corteza oceánica en las crestas de expansión (por ejemplo, la Cuenca de Guaymas), las cuales se conectan con otras a lo largo de estructuras escalonadas formando fallas de transformación. Precisamente una de esas fallas, es la que forma el Sistema de San Andrés que penetra al continente por la desembocadura del Río Colorado, cruza por la ciudad de los Ángeles para salir nuevamente al Océano Pacífico por la ciudad de San Francisco (Torres, et al., 1993).

Como consecuencia de la apertura del Golfo de Baja California y la formación de los sistemas de fallas transformantes (con rumbo predominante Noroeste-Sureste), se han emplazado estructuras volcánicas a lo largo de las discontinuidades corticales generadas por ellas, algunas de las cuales han evolucionado a sistemas hidrotermales activos.

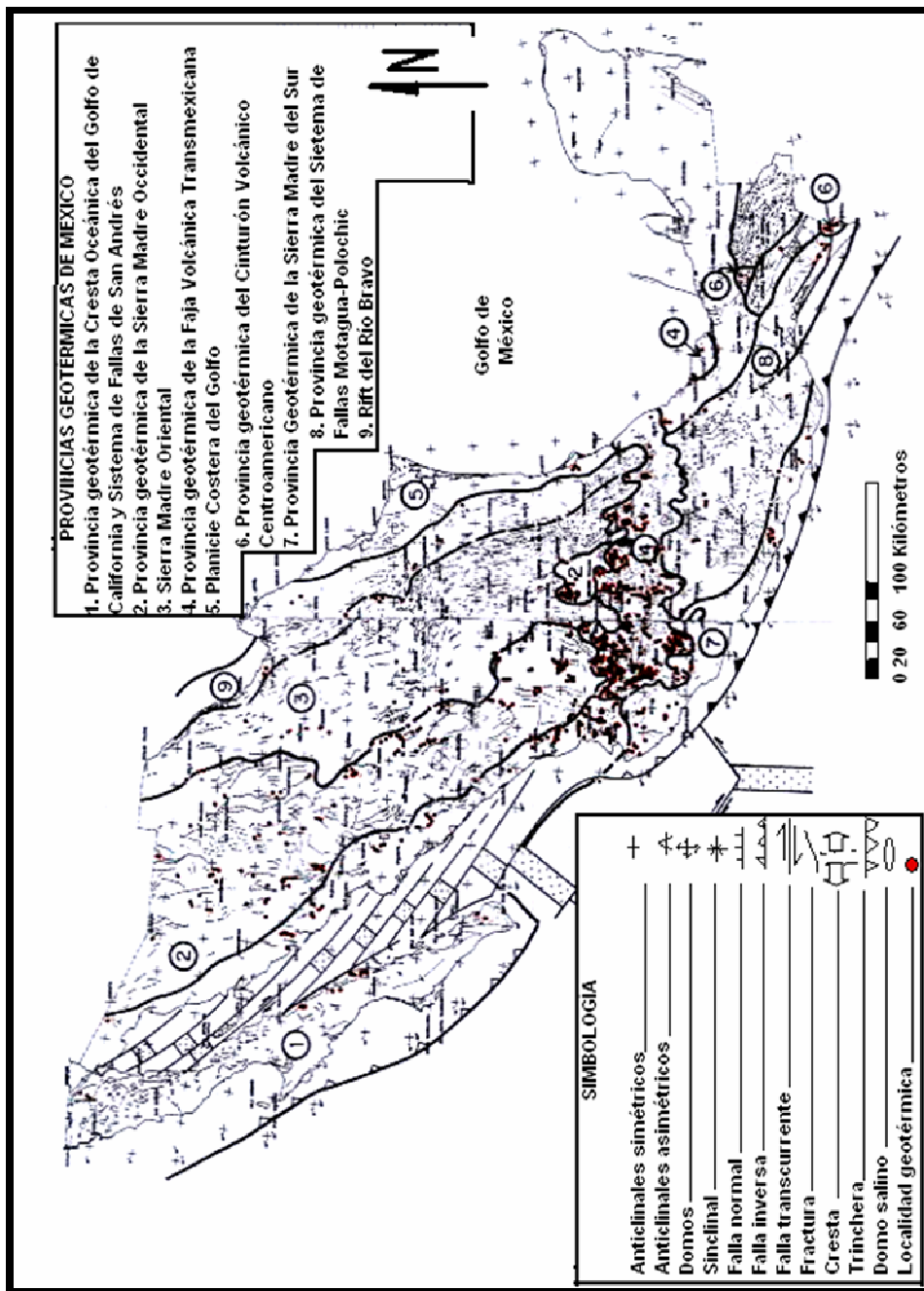


Figura V.2. Provincias Geotérmicas de México. 1. Provincia Geotérmica del Golfo de California y Sistema de Fallas San Andrés, 2. Provincia Geotérmica de la Sierra Madre Occidental, 3. Sierra Madre Oriental, 4. Provincia Geotérmica de la Faja Volcánica Transmexicana, 5. Planicie Costera del Golfo, 6. Provincia Geotérmica del Cinturón Volcánico Centroamericano, 7. Provincia Geotérmica de la Sierra Madre del Sur, 8. Provincia Geotérmica del Sistema de Fallas Motagua-Polochic y 9. Rift del Río Bravo (Modificada de Torres, et al., 1993).

El mejor ejemplo de este fenómeno es el Campo Geotérmico de Cerro Prieto (Baja California) en el que hay evidencias de volcanismo e hidrotermalismo actuales. Se conocen, también, localidades geotermales a lo largo de las costas de los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit. Entre ellas se encuentran: San Luis Río Colorado y Sonoita (Sonora), Guamuchil y Topolobampo (Sinaloa), y la zona volcánica de Tepic-Acaponeta, Ixtlán del Río (Nayarit) y Mascota (Jalisco). Los fluidos característicos de la zona son sódico-clorurados. También se han determinado sódico-bicarbonatados, aunque con menor frecuencia. A la provincia geotérmica definida en este ambiente tectónico (Figura V.3) se le propone el nombre de **Provincia Geotérmica de la Cresta Oceánica del Golfo de California** (Torres, et al., 1993).

La disposición de las anomalías termales en los centros volcánicos que van desde el volcán El Arenal (Jalisco) hasta Tepic (Nayarit), muestran una estrecha vinculación con el curso de los ríos. A lo largo de esta región, las manifestaciones termales se localizan en los cauces de los ríos San Pedro Mezquital, Grande de Santiago, Ameca, Los Patitos, Juchipila, Herrería y Armería, entre otros (Torres, et al., 1993).

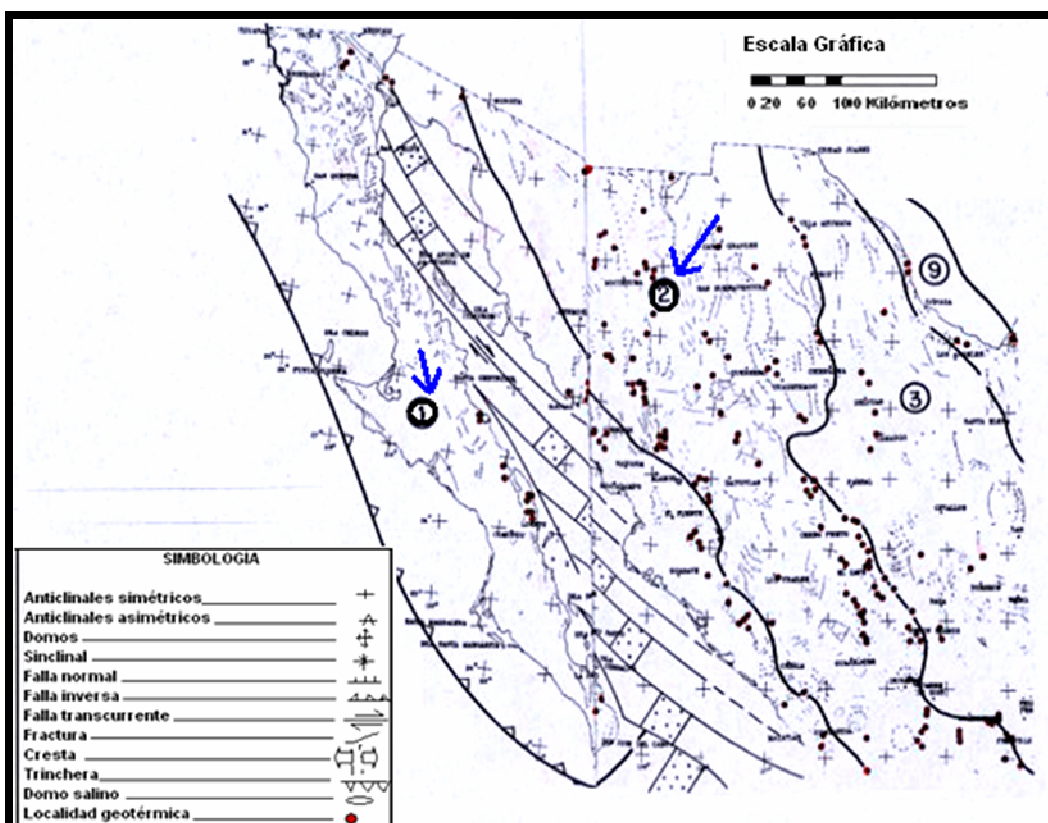


Figura V.3 Provincias geotérmicas del noroeste de México. 1. Provincia Geotérmica del Golfo de California y Sistema de Fallas San Andrés, y 2. Provincia Geotérmica de la Sierra Madre Occidental (Modificada de Torres, et al., 1993).

El carácter alcalino de las lavas depositadas en esta región, muestran influencia de fracturas corticales profundas relacionadas, en primer término, con la dinámica de apertura del Golfo de California, luego, con la instalación de

un proto-rift que tenderá a separar el Bloque Jalisco del continente; esta zona presenta gran acumulación de focos termales a lo largo del río Santiago, sobre todo en la región de la Presa de Santa Rosa. Por las características fisicoquímicas de las anomalías reconocidas en esta región y por sus semejanzas tectónicas con el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, el curso del Río Santiago reviste una gran importancia económica en la generación de energía eléctrica, no a través de plantas hidroeléctricas, como se piensa tradicionalmente, sino mediante el aprovechamiento de su potencial geotérmico. Dicho río constituye un límite neotectónico muy activo, con fallas de corrimiento lateral e intensa actividad volcánica (Torres, et al., 1993).

V.2.2 Sistema de Fallas de la Sierra Madre Occidental

Las manifestaciones termales a lo largo de la Sierra Madre occidental adquieren orientaciones características, por lo que es posible definir alineamientos bien marcados en dirección Norte-Sur, paralelos a la antigua zona de subducción, inactiva desde hace 12 millones de años. Estas estructuras se distinguen claramente de las del rumbo Norte-Sur, que predominan en las zonas costeras colindantes. Los alineamientos se relacionan con fallas normales que definen un sistema de fosas producto de deformación distensiva. Las más importantes se han observado en los estados de Sonora, Durango y Chihuahua, donde los sistemas de fallas han alcanzado longitudes de más de 300 Km, con lo que evidencian su naturaleza regional (Torres, et al., 1993).

La mayoría de las manifestaciones de aguas termales coinciden con trazas de fallas y fracturas reconocidas en el campo. Otras fuentes termales se alinean en la dirección ya descrita, pero sin que existan evidencias estructurales observables. Esta relación fallas-manifestaciones termales se convierte en una herramienta muy útil para detectar fallas regionales en la zona. El conjunto de puntos de aguas termales (sódico-bicarbonatadas) relacionadas con los sistemas de fallas referidos (Figura V.3), forman la denominada, **Provincia Geotérmica de la Sierra Madre Occidental** (Torres, et al., 1993). Algunas de las localidades que la conforman son las siguientes:

En el estado de Chihuahua se conocen más de 53 manifestaciones termales, algunas de las más importantes son las que afloran en los municipios de Nuevo Casas Grandes, Madera, Temosachic, Guachochi, Maguarichi y Ocampo. Por otra parte, en el estado de Sonora se conocen manifestaciones termales en los municipios de Nogales, Moctezuma, Arizpe y Aconchi. En Durango se tienen manifestaciones termales en los municipios de Guanavechi, Santa María El Oro, Tamazula y Santiago Papasquiaro. En el estado de Zacatecas las fuentes termales son las que afloran en los municipios de Fresnillo y Valparaíso (Torres, et al., 1993).

El límite suroriental lo constituye el Graben de Aguascalientes, en cuyo borde occidental afloran más de 40 manifestaciones de aguas termales, todas ellas de tipo sódico-bicarbonatado. A la altura del paralelo 28 surge un cambio en los valores de concentración de varios parámetros tales como la conductividad, el

sulfato, boro, bicarbonato, sodio, cloro potasio y magnesio (Torres, et al., 1993).

Puesto que la naturaleza de los fluidos tiene que ver con el medio por el cual transitaron, es muy posible que las variaciones detectadas en esta área tengan que ver con cambios importantes en la litología de los materiales atravesados por las aguas y esto viene al caso porque diversos autores han propuesto el límite sur del Cratón Norteamericano en el paralelo 28, lo que podría resultar posible ya que también se observaron comportamientos diferentes en la distribución del estroncio en las rocas de la región.

Un segundo conjunto con aguas termales que tiene características similares, son las que se ubican en la Sierra Madre Occidental; este conjunto de manifestaciones termales se encuentran en algunos sectores del Graben de San Luis Potosí y la zona del Río Verde, en el mismo Estado. El graben está formado por sistemas de fallas normales que dislocan rocas riolíticas, cuyos afloramientos inician en la población de San Felipe (Guanajuato). Algunos de los puntos de agua caliente en esta estructura son los que se ubican en los municipios de Moctezuma y Santa María de Oro, en donde predominan aguas sódico-bicarbonatadas. Por su parte, las manifestaciones del Río Verde, tienen una composición cálcico-sulfatada, por efecto de la vecindad de la Sierra Madre Oriental (Torres, et al., 1993).

V.2.3 Faja Volcánica Transmexicana

La Faja Volcánica Transmexicana (Figura V.4) es una zona volcánicamente activa, que atraviesa el país de este a oeste, en la que se alojan el 79 por ciento de las anomalías termales conocidas en México. Por su importancia, se propone el nombre de **Provincia Geotérmica de la Faja Volcánica Transmexicana** (Torres, et al., 1993). Su origen está relacionado con la subducción oblicua de las Placas de Cocos y Rivera bajo la Placa de Norteamérica. El volcanismo es de tipo andesítico-basáltico con algunos centros de evolución a rocas ácidas, donde se tienen estratovolcanes poligénéticos, volcanes monogenéticos (conos cineríticos), volcanes de escudo, calderas y derrames fisurales (Torres, et al., 1993).

La mayor concentración de focos termales se ubica en el borde norte de la Faja Volcánica Transmexicana, coincidiendo con la presencia de calderas en esta porción. Como ejemplo, se tienen a la Caldera de la Primavera (Jalisco) y la de Los Humeros (Puebla). En contraparte, el borde sur se caracteriza por la presencia de los grandes estratovolcanes (Colima, Toluca, Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Orizaba), conos cineríticos y un menor número de manifestaciones termales (Torres, et al., 1993).

Por otra parte, la configuración del basamento de la porción occidental de la Faja Volcánica Transmexicana tiene ciertos efectos en la distribución de algunos componentes químicos de las aguas termales. Las configuraciones de los constituyentes como: sulfato, bicarbonato, boro, sodio, cloro, potasio, magnesio y litio, cuyas curvas siguen sensiblemente la forma de la Sierra Madre Occidental, tienen su continuidad dentro de la porción occidental de la

Faja Volcánica Transmexicana. Como se mencionó anteriormente, la naturaleza de los fluidos termales se ve altamente influida por los sustratos atravesados, aportando información de éstos al tratarse de aguas de circulación profunda. En consecuencia, las formas de las curvas antes mencionadas, podrían corresponder al basamento común entre la Sierra Madre Occidental y la porción occidental de la Faja Volcánica Transmexicana (Torres, et al., 1993).

Otro punto interesante que se deriva del estudio de la disposición geográfica de las anomalías termales, lo constituye la localización del límite oriental del Faja Volcánica Transmexicana. El número de anomalías termales disminuye abruptamente en la región entre los poblados de Jalapa y Actopan (Veracruz), coincidiendo con el límite oriental de la Faja Volcánica Transmexicana sugerido por Torres, et al., 1993.

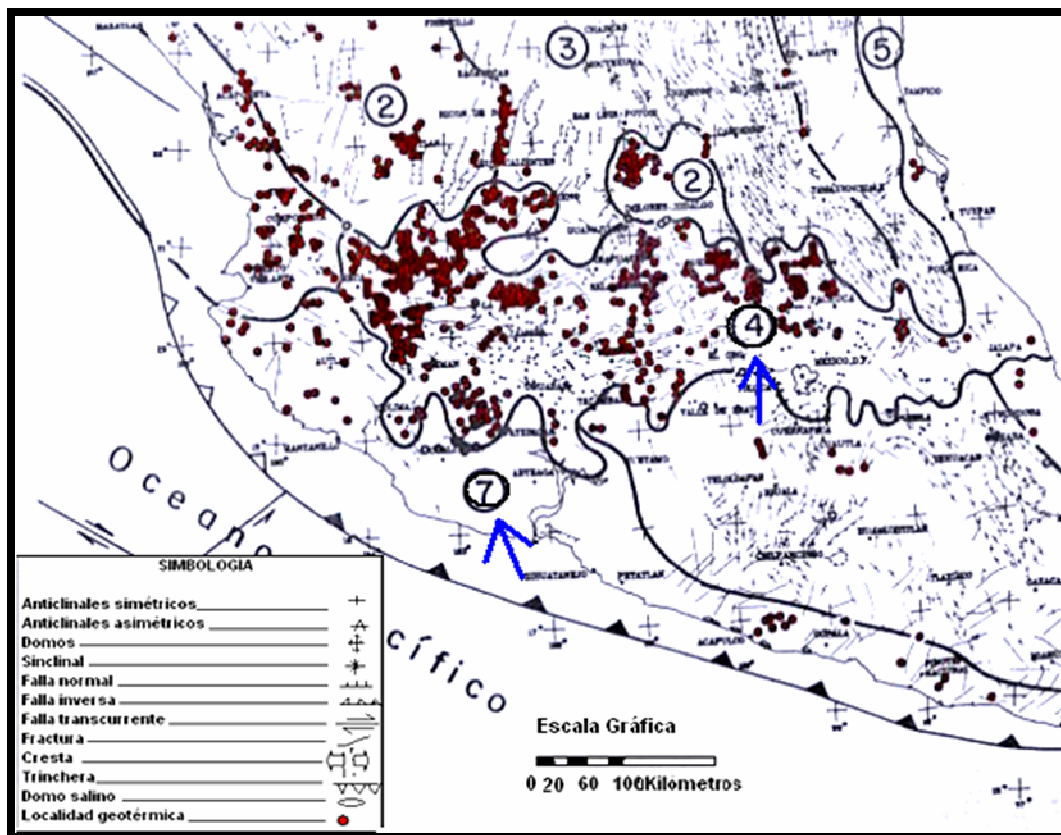


Figura V.4 Provincias geotérmicas del centro de México. 4.Provincia Geotérmica de la Faja Volcánica Transmexicana y 7.Provincia Geotérmica de la Sierra Madre del Sur.

La Faja Volcánica Transmexicana llega a las costas de Veracruz con rocas de composición alcalina y toleítica, como las que se encuentran en la Sierra Madre Oriental.

Al sur de la Faja Volcánica Transmexicana se ubican los centros volcánicos de San Andrés-Tuxtla (Veracruz) y Chichón-La Unión (Chiapas), se presentan en posiciones intermedias entre la Faja Volcánica Transmexicana y la Cadena Volcánica Centroamericana. El primero de ellos, posiblemente esté relacionado con la Faja Volcánica Transmexicana y, el segundo, a la Cadena Volcánica

Centroamericana. En ambos centros se han detectado importantes manifestaciones termales (Torres, et al., 1993).

V.2.4 Cadena Volcánica Centroamericana

La Cadena Volcánica Centroamericana (Plio-Cuaternaria), forma una franja de volcanes paralela a la línea de costa relacionada con la subducción frontal de la Placa de cocos bajo la Placa de Norteamérica. Dentro de la República Mexicana el Volcán del Tacaná constituye la expresión más occidental de esta cadena (Figura V.5). En dicha zona se han detectado aguas termales sódico-sulfatadas (Torres, et al., 1993).

V.2.5 Sistema de Fallas Motahua-Polochic

El sistema Motahua-Polochic es un sistema de fallas laterales izquierdas, que separan la Placa del Caribe de la de Norteamérica. El sistema penetra en México como una serie de fallas paralelas que cortan el macizo de Chiapas, algunas de las cuales se internan en el Golfo de Tehuantepec. Este sistema ha sido cartografiado dentro del golfo, descubriéndose que tiene una traza paralela a la costa y penetra nuevamente en el continente formando el Río Tehuantepec, después de describir una amplia curvatura (Figura V.5). A lo largo de este río se conocen algunas manifestaciones termales del tipo sódico-clorurado (Torres, et al., 1993).

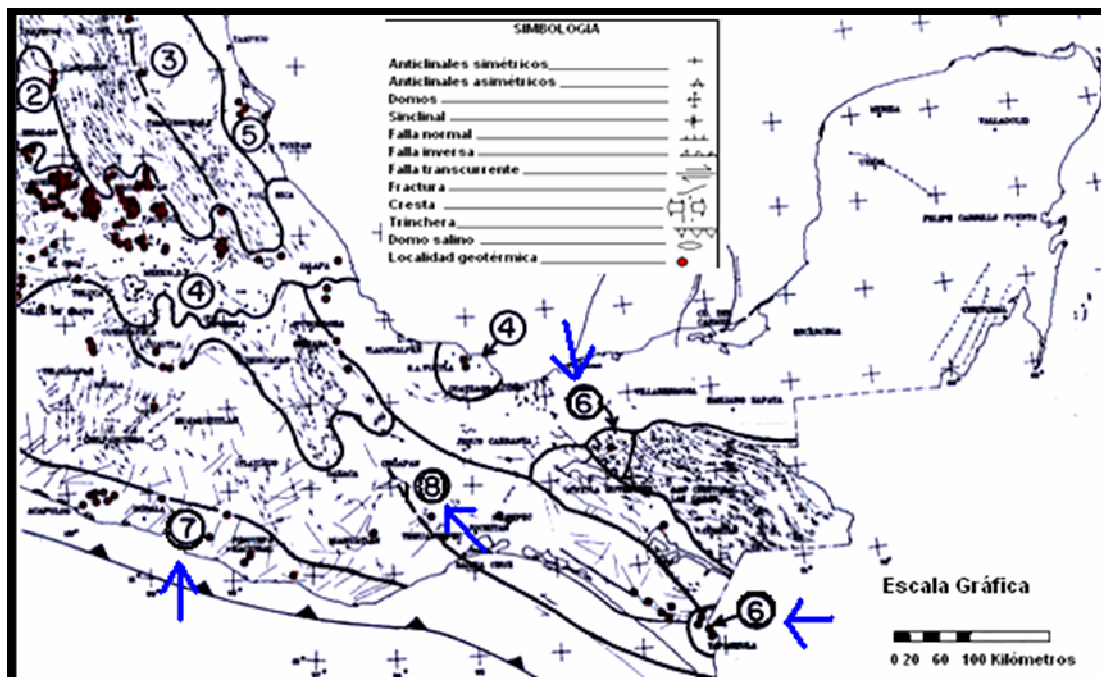


Figura V.5 Provincias geotérmicas del sur de México.6.Provincia Geotérmica del Cinturón Volcánico Centroamericano, 7.Provincia Geotérmica de la Sierra Madre del Sur, 8.Provincia Geotérmica del Sistema de Fallas Motagua-Polochic (Tomado de Torres, et al., 1993).

En la zona costera de Chiapas confluyen dos elementos tectónicos importantes: el extremo occidental de la Cadena Volcánica Centroamericana y el paso del Sistema de Fallas Motahua-Polochic. El efecto combinado de

ambos sistemas da por resultado la formación de anomalías termales relacionadas, bien sea con la actividad hidrotermal del Volcán Tacaná, o con las fallas de corrimiento lateral. Con respecto a estas últimas, las manifestaciones termales conocidas como las de Pijijiapan, Escuintla y Motozintla, son de carácter sódico-sulfatado y están alojadas en trazas de fallas con rumbo Este-Oeste.

V.2.6 Arco magmático peripacífico del sur de México

La Sierra Madre del Sur se caracteriza por presentar a lo largo de sus costas, un conjunto de cuerpos intrusivos, muchos de ellos de tamaño batolítico, con edades radiométricas que van desde el Paleozoico hasta el Cenozoico (Torres, et al., 1993).

Este conjunto litológico está claramente relacionado con el Cinturón Orogénico Cordillerano que recorre todo el occidente de México y que está originado por los procesos de subducción de la Placa del Pacífico desde tiempos Paleozoicos. Como consecuencia, puede afirmarse, para el occidente de México, la existencia de un Arco magmático Peripacífico análogo al que recorre el sur del continente americano.

Dentro del arco magmático las manifestaciones termales se ubican (Figura V.5) en forma paralela a la línea de costa: desde la bahía de Acapulco hasta el inicio del Golfo de Tehuantepec (estados de Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca (Torres, et al., 1993).

Por guardar una simetría paralela con respecto a la Trinchera Mesoamericana, las anomalías de presentes en esta zona, se pueden asociar a la tectónica de margen continental activa reconocida en esta región, presentándose como zonas de gradientes geotérmicos anómalos. El vulcanismo, producto de este mismo proceso, se localiza más al norte, a lo largo de la Faja Volcánica Transmexicana, por lo que es de esperarse que en las proximidades de la trinchera, donde la placa en subducción está a poca profundidad, los fenómenos preponderantes sean del tipo de difusión térmica. Si bien son escasas las manifestaciones de aguas termales, se propone el nombre de ***Provincia Geotérmica del Sur de México*** (Torres, et al., 1993).

V.2.7 Sierra Madre Oriental

Las anomalías termales de la Sierra Madre Oriental se localizan en dirección de los alineamientos de las fallas inversas y cabalgamientos que lo conforman. Lo anterior, nuevamente pone de manifiesto la relación existente entre la distribución del termalismo y distribución de elementos tectónicos importantes.

Las mayores concentraciones se ubican en el borde oriental de la sierra (Figura V.6), coincidiendo con el límite Este del Cratón Precámbrico. Algunas de las manifestaciones alineadas con este movimiento tectónico son las de: Los Ángeles (Chihuahua), Monterrey y Linares (Nuevo León), y ciudad Mante (San Luis Potosí). La mayoría de los fluidos son cálcico-sulfatados (Torres, et al., 1993).

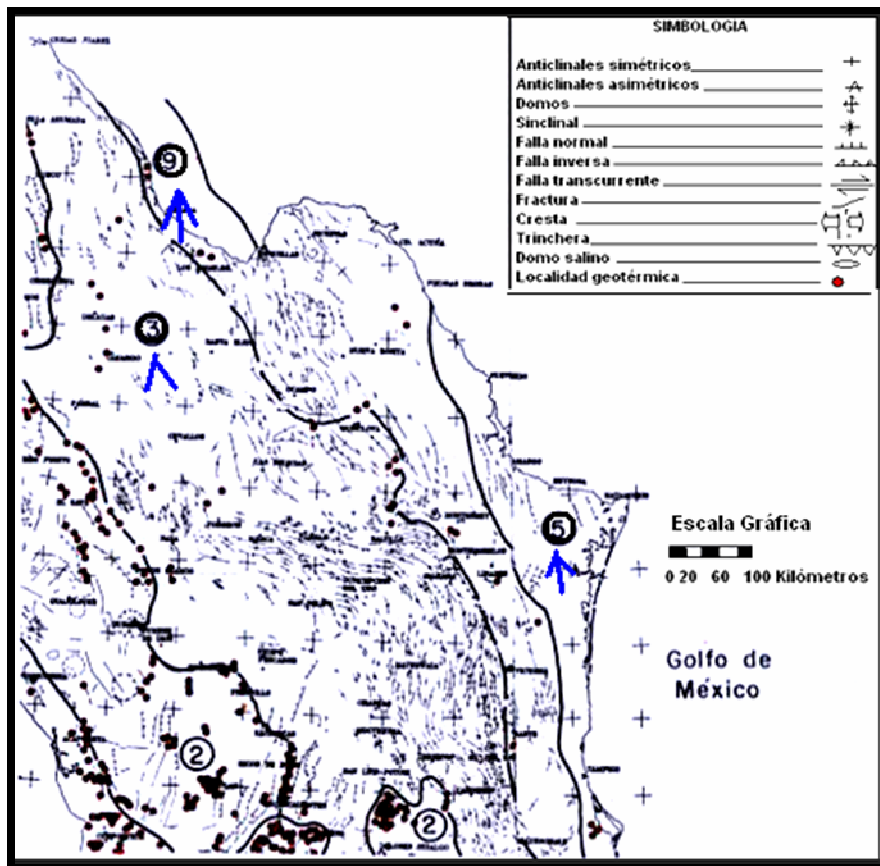


Figura V.6 Provincias geotérmicas del noroeste de México. 3. Sierra Madre Oriental, 5. Planicie Costera del Golfo y 9. Rift del Río Bravo (Tomado de Torres, et al., 1993).

V.2.8 Planicie Costera del Golfo de México

La planicie Costera del golfo de México se caracteriza por un conjunto de rocas clásticas marinas cenozoicas, dentro de las cuales se han detectado indicios de sistemas geotérmicos geopresionados (Figura V.6).

Estos sistemas consisten en atrapamientos de agua caliente y gas natural en los poros de los sedimentos y transferencias de calor conductivo. Si bien son muy escasas sus manifestaciones superficiales, puesto que el sistema sólo existe si está presurizado, las perforaciones petroleras en el Noreste de México han detectado fuertes concentraciones de dicha mezcla. Como punto interesante de este tipo de concentraciones, el recurso tiene un doble aprovechamiento: como energía geotérmica y como gas natural combustible. Hasta el momento, su aprovechamiento es subeconómico (Torres, et al., 1993).

V.2.9 Rift del Río Bravo

El Río Bravo en su recorrido desde Ciudad Juárez hacia Ojinaga (Chihuahua) labra su cauce dentro del rift del mismo nombre (Figura V.6). El Rift del Río Bravo (Río Grande), inició su desarrollo hace 28 o 29 millones de años dentro de un régimen distensivo, produciendo efusiones de andesitas basálticas. El más reciente episodio data de entre nueve a tres millones de años con afusiones de basaltos alcalinos de olivino. Como resultado de la actividad

volcánica reciente, se han desarrollado manifestaciones de aguas termales en la Cuenca de Presidio (Noreste de Ojinaga) con fluidos sódico-clorurados (Torres, et al., 1993).

En México, la ubicación geográfica de los principales campos geotérmicos cubre fundamentalmente las regiones central y occidental de la República, en el centro, abundan las rocas volcánicas jóvenes. Por otra parte, la porción submarina del Golfo de California contiene recursos geotérmicos relacionados con las zonas de ruptura de la Dorsal del Pacífico oriental. Dicha dorsal presenta un sistema de fallas normales escalonadas, dentro de las cuales se produce el crecimiento de la corteza oceánica, vía salida de magmas basálticos. Este proceso magmático-tectónico es el responsable de la separación de la península de California del Golfo de California, la dorsal tiene cerca de 1600 Km de largo, con un ancho promedio de 6 Km.

Una vez que se ha realizado un recorrido por la República Mexicana conociendo las zonas que presentan manifestaciones termales, es evidente que México tiene un muy importante potencial geotérmico, parte del cual se utiliza actualmente para generar energía eléctrica. A continuación se describen las principales características de estos yacimientos.

V.3 YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS EN MÉXICO

Actualmente existen cinco campos geotérmicos identificados en México con potencial para producir energía eléctrica, cuatro de las cuales se encuentran bajo explotación con una capacidad total instalada de 958 MW, lo que representa el 2.1% de la producción eléctrica total del país operada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Tales campos son los siguientes (Figura V.7):



Figura V.7 Campos geotérmicos identificados en México (Modificado de: Geotermia.org.mx, 2008).

- Cerro Prieto, B.C., con 720 MW de capacidad.
- Los Azufres, Mich., con 188 MW de capacidad.
- Los Humeros, Pue., con 40 MW de capacidad.
- Las Tres Vírgenes, B.C.S., con 10 MW de capacidad.
- Cerritos Colorados, Jal., con un potencial estimado por la CFE en 75 MW.

Si bien la energía eléctrica de origen geotérmico sólo representa el 2.1% de la electricidad que se consume en el país, localmente la geotermia puede satisfacer más de la mitad de la demanda de las comunidades próximas, tal como ocurre en el campo de Cerro Prieto, Baja California. Un proyecto con 100 MW adicionales se construye en el campo de Los Azufres, Michoacán, y se han identificado otras zonas y campos adicionales cuyos recursos pueden utilizarse no sólo para generar electricidad, sino para diversos usos directos e indirectos.

V.3.1 CERRO PRIETO, BAJA CALIFORNIA

El Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California (CGCP), se localiza en la porción norte de México, muy cerca de la frontera con Estados Unidos, a unos 30 kilómetros al sureste de la ciudad de Mexicali, entre los meridianos 115° 12' y 115° 18' longitud oeste y los paralelos 32° 22' y 32° 26' de latitud norte (Fig.V.8).

El Campo Geotérmico Cerro Prieto, se compone de yacimientos geotérmicos de líquido dominante, alojados en un ambiente sedimentario. Está ubicado dentro de la cuenca de Salton, (que abarca desde Salton Sea en la porción sur del estado de California, Estados Unidos, hasta el Golfo de California y forma parte del sistema tectónico de San Andrés) que es una cuenca de tipo *pull-apart*, formada por fallas transcurrentes con desplazamientos normales transtensión de dirección general NO-SE, que son parte del sistema de fallas de San Andrés. Las fallas más importantes reconocidas en la zona del Campo Geotérmico Cerro Prieto son la Cucapá, Cerro Prieto, Michoacán e Imperial (Aguilar, 2009).

Es el segundo campo más grande del mundo, sólo inferior al de “*The Geysers*”, Estados Unidos, y está prácticamente al nivel del mar.

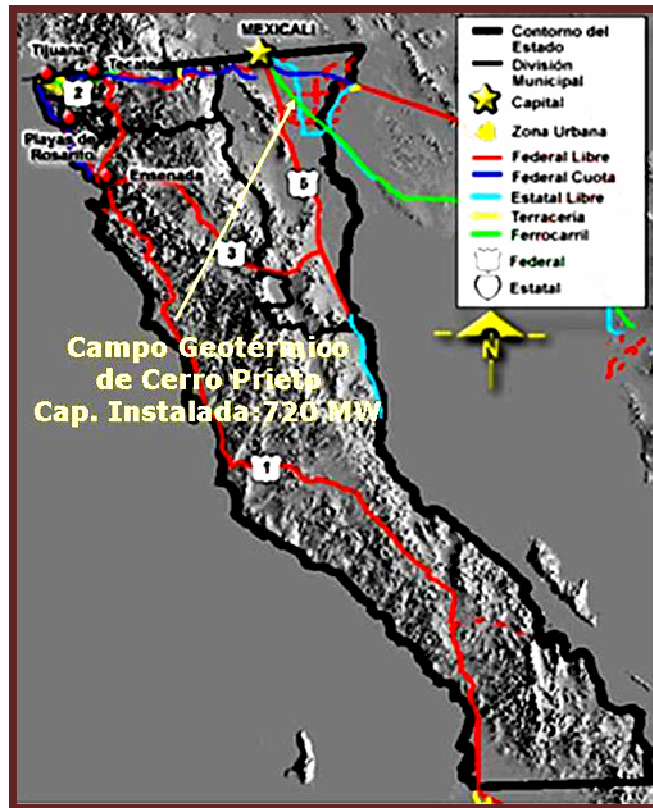


Figura V.8 Localización del campo geotérmico Cerro Prieto (Tomada de Aguilar Dumas, 2009).

La cuenca de origen tectónico está rellena de sedimentos continentales y marinos terciarios-cuaternarios, que sobreyacen a un basamento constituido por rocas graníticas; el límite occidental de la cuenca lo forma la Sierra Cucapá, compuesta por rocas ígneas intrusivas. La estructura volcánica de Cerro Prieto consta de dos centros eruptivos superpuestos y es el origen de los afloramientos de rocas volcánicas de composición andesítica y riódacítica.

La distribución de los sedimentos en los valles de Mexicali e Imperial se ha visto afectada por el movimiento hacia el NW de la Península de Baja California, a lo largo del sistema de fallas de San Andrés, desde hace aproximadamente 4 millones de años. Se ha estimado una velocidad de desplazamiento de 36 mm al año a lo largo de la Falla San Andrés, que junto con el desplazamiento al norte de la península a través de las fallas Imperial (Figura V.9), Elsinore, Laguna Salada, Cerro Prieto, etc., sugiere un desplazamiento de rumbo N-NW del orden de 300 km de la península con respecto al continente. El efecto de este movimiento en la desembocadura del Río Colorado durante el Cuaternario es el alargamiento de las cuencas de Salton y de Cerro Prieto en cuencas tipo *pull-apart*, elongadas en dirección NW, donde se encuentra la fuente de calor para los yacimientos geotérmicos (Aguilar, 2009).

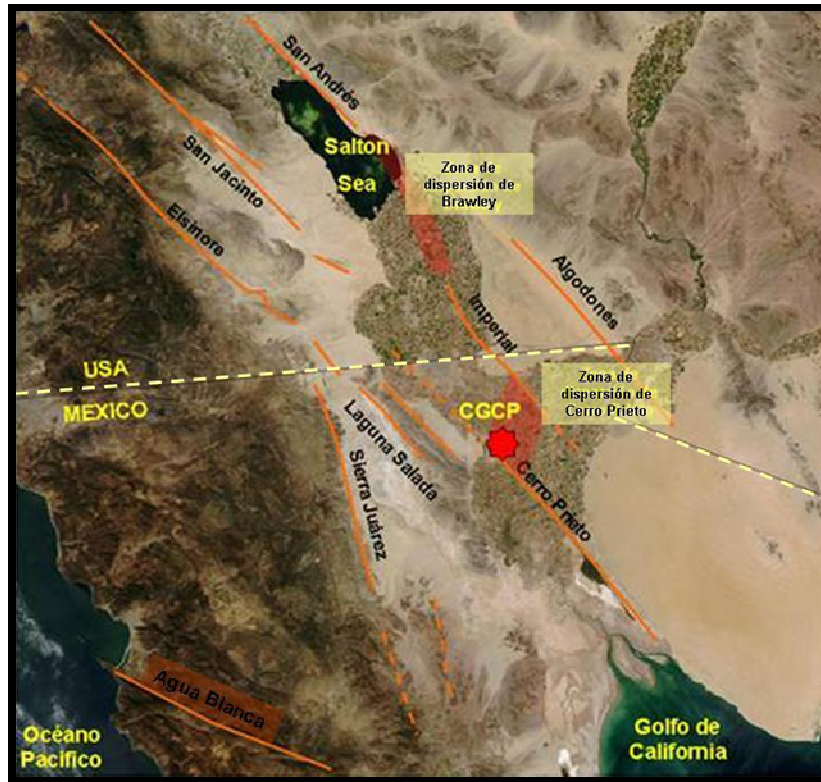


Figura V.9 Rasgos estructurales regionales relacionados con el Campo Geotérmico Cerro Prieto (Tomada de Aguilar, 2008).

La geología local de la región está integrada por las siguientes unidades litológicas que se describen de la más antigua a la más reciente (Aguilar, 2009):

- Gneiss y esquistos de biotita de edad Pérmico-Jurásico, rocas batolíticas del Cretácico (Edad aproximada: 120 ma): Los principales ejemplos de rocas intrusivas que afloran en áreas cercanas al CGCP forman gran parte de la Sierra Cucapá y de la Sierra El Mayor y son de composición granítica a tonalítica.
- Rocas Sedimentarias del Terciario (Edad de 13.5 a 1.8 Ma): están compuestas por una secuencia de lutita gris a negro intercalada con areniscas de cuarzo de grano fino a medio, donde se aloja el yacimiento geotérmico; la cima de esta unidad la constituyen lutitas de color café y lodolitas.
- Depósitos Aluviales del Pleistoceno y Reciente (Edad de 1.8 ma a 100,000 años): en el CGCP se les conoce como Sedimentos Clásticos no Consolidados (SCNC) y están conformados por secuencias de arenas, gravas y arcilla color café; su espesor es de 500 a 2300 metros, siendo en el este del CGCP donde presenta su mayor profundidad.
- Rocas Ígneas Extrusivas del Cuaternario: Están presentes en el volcán Cerro Prieto, siendo de composición andesítica a riódacítica.

En cuanto a la geología estructural, localmente hay tres importantes fallas reconocidas en la zona (Aguilar, 2009): Cerro Prieto, Michoacán y Sistema de Fallas H (Fig. V.10). En el CGCP la falla Cerro Prieto (FCP) es de rumbo NE-SW, con echado al W de 75°- 80°. Es una estructura que pertenece al sistema de fallas Cerro Prieto, el cual es un sistema del tipo dextral que se extiende desde el centro de dispersión de Cerro Prieto hasta la Cuenca de Wagner. El trazo de la falla es visible únicamente en su sector sur; la parte norte ha sido determinada por mecanismos focales y métodos geofísicos. Recientemente, apoyados con localización de hipocentros de movimientos sísmicos, se determinó que la FCP se extiende 34 km adicionales al noroeste desde su último afloramiento reconocido, aproximadamente a 32°42' de latitud N (Magistrale, 2002). Es la estructura que marca la frontera entre las Placas Norteamérica y Pacífico en el Valle de Mexicali; su desplazamiento promedio es mayor a 50 mm al año (Cruz, 2002). El Sistema de Fallas H, de rumbo NE-SW y echado al E de 45° a 65°, es producto de los esfuerzos de tipo dextral entre la Falla Imperial y el sistema de fallas Cerro Prieto.

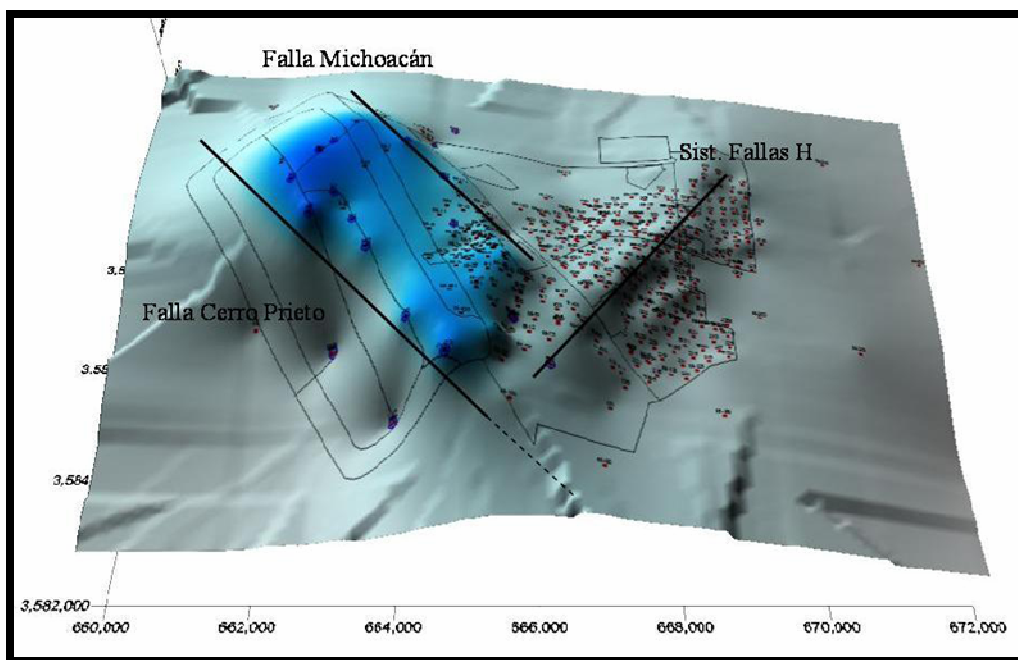


Figura V.10 Modelo estructural del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (Tomada de Aguilar, 2009).

La Falla Michoacán pertenece al mismo sistema de fallas Cerro Prieto, tiene rumbo NW-SE con echado variable al E. Esta estructura y la falla Cerro Prieto forman un horst o bloque levantado que se acuña al sur.

La deformación por extensión que originó la Provincia de Cuencas y Cordilleras (*Basin and Range*) del oeste de Estados Unidos y noroeste de México durante el Terciario Superior, en el área de Cerro Prieto dio como resultado la formación de una cuenca de tipo medio graben, entre las fallas

Cerro Prieto e Imperial (Cuenca Cerro Prieto), en la que se interpreta la existencia de fallas lístricas con dirección predominante noroeste-sureste y noreste-suroeste, que se escalonan en forma general al NE. La zona de debilidad cortical generada durante el Terciario permitió el emplazamiento de un intrusivo de composición básica dentro de la cuenca, el cual ha sido asociado con una anomalía magnética, denominada Nuevo León; este intrusivo ha sido alimentado por nuevas intrusiones magmáticas originadas por la actual tectónica transtensional del Golfo de California (Aguilar, 2008).

El CGCP empezó a explotarse comercialmente en 1973, a partir de esa fecha se ha extraído el vapor geotérmico que se distribuye a las diferentes centrales generadoras. Los fluidos que alimentan al yacimiento geotérmico son calentados al pasar por la zona donde se localiza el intrusivo básico (fuente de calor) y migran a través de las fallas lístricas hacia estratos permeables (areniscas), que se localizan dentro del paquete de lutitas grises terciarias. Los paquetes superiores de lutitas forman la capa sello. Fluidos de menor temperatura están recargando el yacimiento a través de pozos de inyección localizados en la porción oeste del campo con objeto de mantener la presión del yacimiento (Aguilar, 2008).

Actualmente se tiene una capacidad instalada de 720 MW y se extraen aproximadamente 6 mil t/h de vapor para cumplir la demanda de las centrales. Hay un total de 353 pozos perforados, de los cuales alrededor de 170 se encuentran integrados al proceso productivo. En las instalaciones de esta Central se cuenta con trece unidades generadoras y está dividida en cuatro casas de máquinas, denominadas: Cerro Prieto I, Cerro Prieto II, Cerro Prieto III y Cerro Prieto IV. Se tienen cuatro unidades de 25 MW, una unidad de 30 MW, cuatro de 37,5 MW cada una, y otras cuatro de 110 MW cada una. Hay un promedio de 170 pozos en producción continua, con profundidades promedio de 2.500 metros, que suministran alrededor de 46 millones de toneladas de vapor, al año a una tasa de 6 mil toneladas de vapor por hora (Aguilar, 2008).

En este campo funciona una laguna de evaporación construida en una superficie de 14 kilómetros cuadrados, con la cual, y con ocho pozos inyectoras, se dispone de los más de 70 millones de toneladas de salmuera que salen asociadas al vapor. Como capacidad de producción, Cerro Prieto tiene 6307.2 GWh por año, operando las unidades al 100% de su capacidad durante las 24 horas del total de días en el año. Durante 2008, sus trece unidades generaron más de 5.000 Gigawatts-hora (GWh) (CFE, 2009).

V.3.2 LOS AZUFRES, MICHOACÁN

El campo geotérmico de Los Azufres, fue descubierto en 1972, está localizado en la parte central de México, en el Estado de Michoacán, a 92 km al este de la ciudad de Morelia a 30 km al NNW de Ciudad Hidalgo, que es el poblado más cercano e importante localmente; se encuentra en un complejo

volcánico que forma la Sierra de los Azufres, a 2.800 metros de altitud (Figura V.11) (González, 2001).

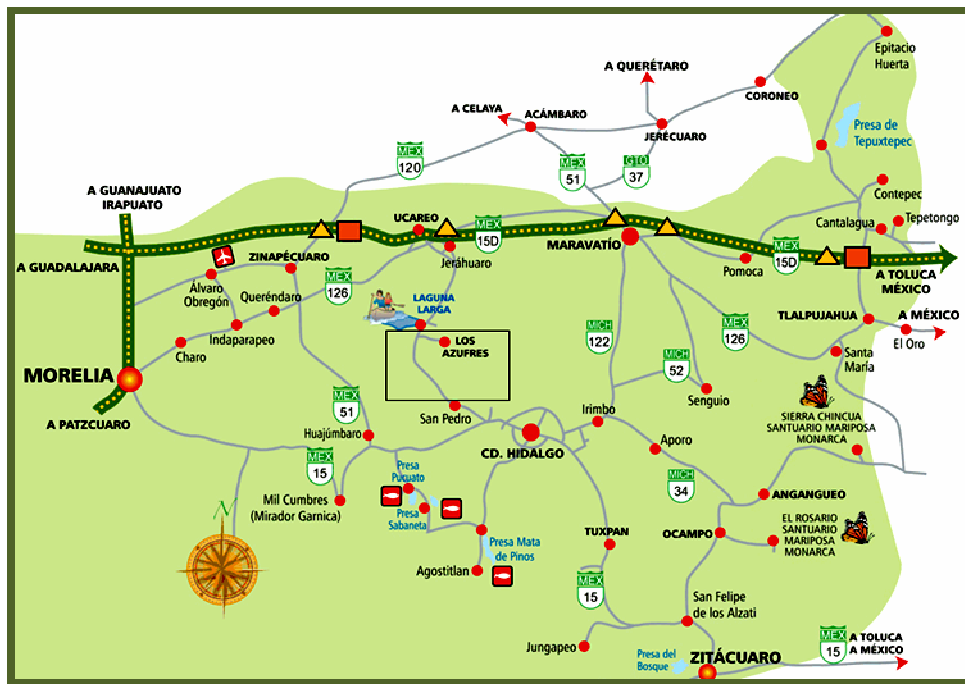


Figura V.11 Localización del Campo Geotérmico Los Azufres, Michoacán (Tomada de www.michoacán.com, 2009).

En Los Azufres, se ha aprovechado exitosamente a la energía geotérmica para generar electricidad desde 1982, en este campo la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuenta con una potencia instalada de 88 MW, explotando comercialmente un área de aproximadamente 35 km². Se tiene proyectado ampliar la capacidad de generación con la construcción próximamente de dos unidades de 20 MW cada una. Los Azufres es el primer campo geotérmico que genera electricidad a partir de fluidos saturados en roca volcánica y es el segundo en importancia en México, después de Cerro Prieto, B.C.

Las rocas más antiguas que afloran están constituidas por un paquete de más de 2,000 m de derrames andesíticos, con intercalaciones de paleosuelos, aglomerados y coladas basálticas (Figura V.12 y V.13). La edad de las rocas más antiguas que afloran es de 18 [Ma]. Sobre las rocas anteriores se depositó discordantemente un ciclo volcánico de composición ácida formado por ignimbritas, tobas y cenizas de edad 1.05 a 0.84 [Ma]. Encima de esta secuencia, se formaron depósitos lacustres del Pleistoceno asociados al colapso de la caldera de los Azufres de edad Cuaternaria. La Dacita San Andrés representa una fase volcánica importante, cuya edad es de 0.3 [Ma], y es seguida de depósitos ignimbríticos de 0.28 [Ma] e inyecciones riolíticas que forman estructuras dómicas de 0.14 [Ma]. La última etapa volcánica en la región, es de composición básica con afloramientos de derrames al este y oeste del campo y cineritas en los alrededores. La geoquímica de roca total

realizada en las diferentes unidades litoestratigráficas, manifiesta una tendencia calclcalina. Esta zona se ubica casi en el centro de la Faja Volcánica Mexicana, que es una franja de volcanes y productos volcánicos cuaternarios que atraviesa México de costa a costa y en la cual se encuentran varios volcanes en actividad actual (González, 2000).

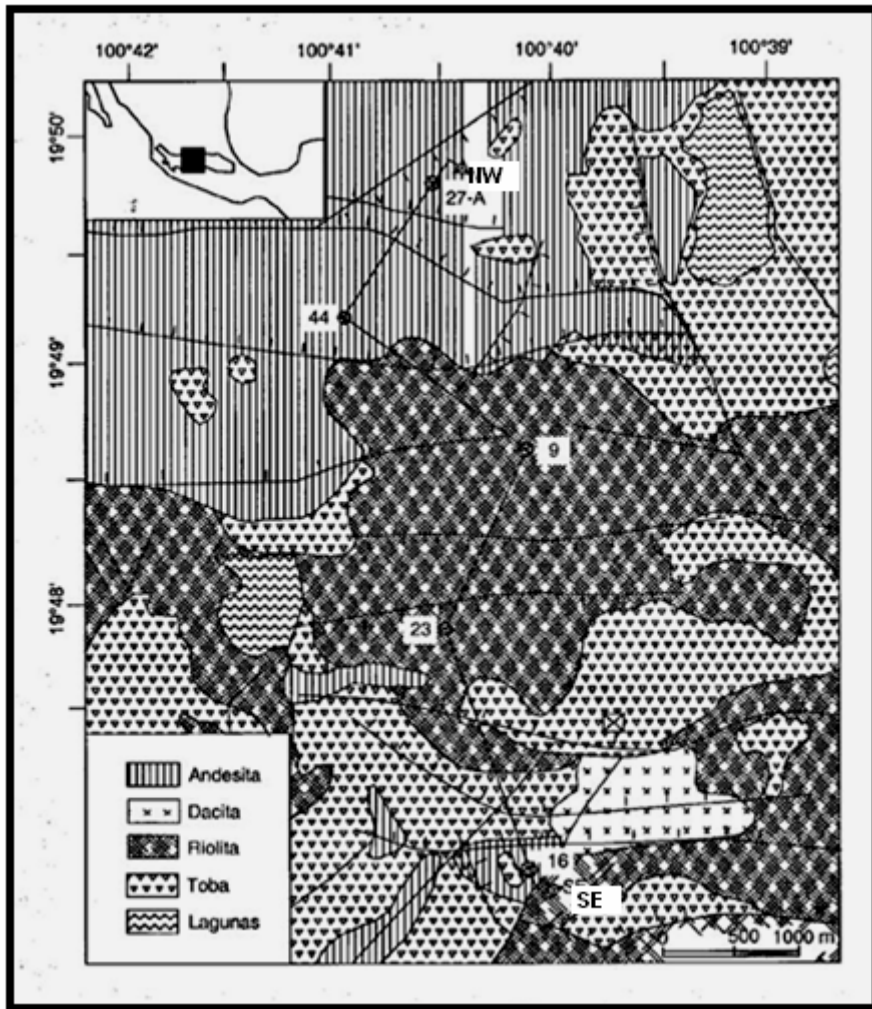


Figura V.12 Mapa geológico-estructural del Campo Geotérmico Los Azufres, Michoacán, la sección SE-NW, se muestra en la Figura V.13 (Tomada de González, 2000).

Los estudios estructurales muestran dos sistemas de fallas principales con inclinación casi vertical. El mayor tiene una dirección E-W y corta otros de menor importancia y más antiguos NE-SW. Las fallas E-W presentan desplazamiento lateral y se relacionan con el sistema regional activo “Acambay” de la Faja Volcánica Transmexicana; ellas intersecan el borde sur de la Caldera de Los Azufres. Las fallas se caracterizan por haber ocasionado porosidad secundaria debido al fracturamiento asociado. La zona de Los Azufres presenta una gran cantidad de manifestaciones hidrotermales, que corresponden con descargas naturales que consisten únicamente de vapor; no existen descargas de líquido geotérmico en el campo. También se tiene como característica una intensa caolinización superficial que se manifiesta

claramente. La “Riolita Agua Fría” constituye un yacimiento en explotación por dicha sustancia (González, 2000).

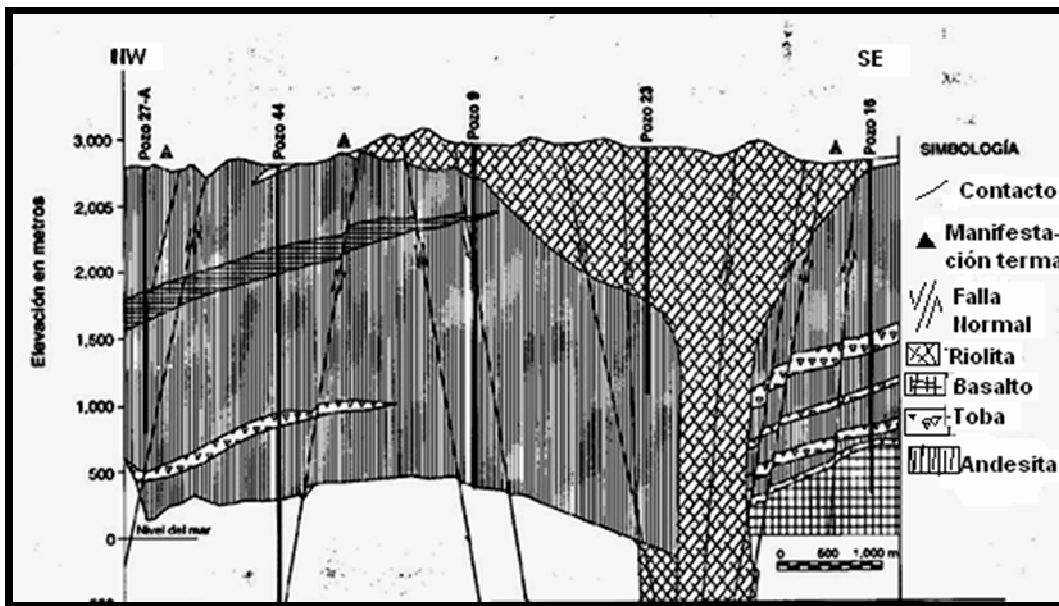


Figura V.13 Sección geológico-estructural SE-NW del campo geotérmico Los Azufres, donde se muestra la localización de algunos pozos de según la Figura V.12 (Tomada de González, 2000).

El predominio de azufre nativo en las manifestaciones geotérmicas con algo de sulfatos y la caolinita definen una alteración hidrotermal de tipo argilización avanzada, y es una respuesta a la intensa interacción de roca-gases-acuífero, ubicado en los niveles someros del yacimiento.

En Los Azufres, el depósito hidrotermal se encuentra a profundidades cercanas a los 3,500 m; la roca encajonante de los fluidos es principalmente andesítica, la alteración hidrotermal profunda es de carácter propilítico y presenta características de un yacimiento de baja sulfidación, ya que los fluidos iniciales (protofluido) son neutros y de baja salinidad. El yacimiento es de alta entalpía con temperaturas del orden de los 330°C y presiones de 170 a 180 bares a fondo de yacimiento (González, 2000).

Los primeros estudios en este campo se efectuaron en los años cincuenta, pero fue en 1977, cuando se perforaron los primeros pozos productores, con los que se confirmó la existencia de un potencial energético de magnitud considerable. En Los Azufres se han perforado más de 80 pozos con profundidades de entre 600 y 3,544 metros y se han registrado valores de temperatura máxima de fondo de 358°C.

En esta zona, el flujo de calor promedio es de 0.22 W/m², lo cual corresponde a un gradiente local de 117°C/km, que es casi cuatro veces mayor que el normal.

Actualmente, la CFE tiene instalados en este campo unidades que producen 188 MWe, distribuidos en una unidad de condensación de 50 MWe, cuatro unidades de flasheo simple 25 MWe cada una, siete unidades a contrapresión de 5 MWe cada una y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MWe cada una. Las unidades de 25 MWe entraron en operación en 2003 (Gutiérrez y Quijano, 2005).

V.3.3 LOS HUMEROS, PUEBLA

Los Humeros, Puebla, al igual que otros campos geotérmicos existentes en México y el mundo, se desarrolló dentro de una caldera volcánica cuya constitución geológica y tectónica hicieron propicio su alto potencial geotérmico. Desde 1982 hasta la actualidad se han perforado unos 40 pozos entre exploratorios, productores e inyectores con un total de metros perforados de 87,352 (Gutiérrez y Quijano, 2005).

El campo geotérmico de Los Humeros (CGLH), está situado en el estado de Puebla (Fig. V.14), cerca de los límites con Veracruz; es el segundo sistema geotérmico mexicano que genera electricidad a partir de fluidos contenidos en rocas volcánicas, los fluidos geotérmicos tienen temperaturas medidas hasta de 400°C. Es el tercer campo geotérmico en importancia en la República Mexicana, después de Cerro Prieto y Los Azufres, está en explotación desde 1991 (López, 2006).

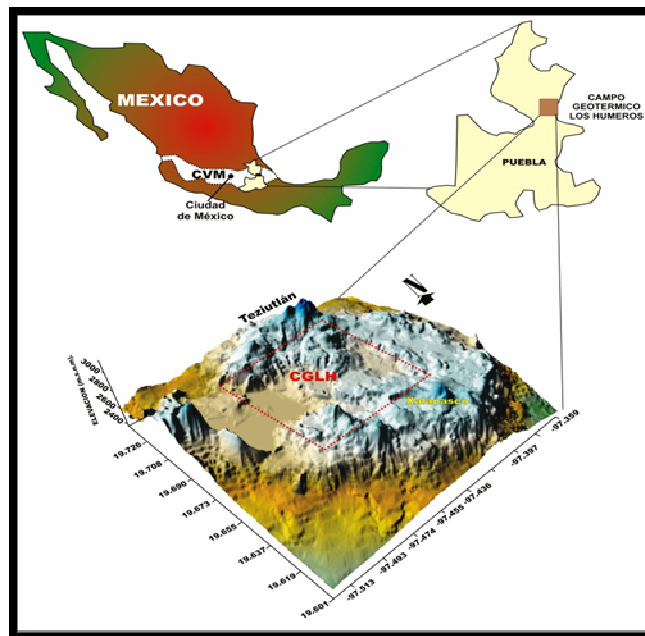


Figura V.14 Localización del Campo geotérmico Los Humeros (Tomada de Lermo, et al., 2006).

El campo está en un valle que pertenece a la cuenca de Libres y Oriental, Puebla, encontrándose a una elevación de 2806 metros sobre el nivel del mar y localizado entre las siguientes coordenadas geográficas: 19° 35' y 19° 45' de latitud Norte, 97° 23' y 97° 35' de longitud Oeste (López, 2006).

La geología del campo geotérmico de Los Humeros ha sido descrita por diversos autores (Pérez, 1978; Yáñez, *et al.*, 1979; Gutiérrez, 1982; Viggiano y Robles, 1988; Cedillo, 2000). El basamento del CGLH está constituido por esquistos y rocas graníticas del Pérmico Tardío al Jurásico Temprano. Cubriendo a estas rocas de manera discordante, aparecen rocas sedimentarias del Triásico-Jurásico, cubiertas a su vez por una secuencia marina del Jurásico Superior al Cretácico Superior, con algunos afloramientos al oeste, este y sur de la caldera de Los Humeros. Sobreyaciendo al basamento descansa una secuencia de andesitas e ignimbritas del Terciario.

La primera acumulación de rocas volcánicas ocurrió hace aproximadamente 11 millones de años (Ma) y está constituida por derrames de andesita de hornblenda, cubiertos parcialmente por derrames de andesitas de augita que procederían de los volcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba (5 Ma) (Lermo, *et al.*, 2008).

El vulcanismo más reciente está representado por coladas de lavas ácidas, básicas y rocas piroclásticas que se observan al centro de la caldera de Los Humeros (Figura V.15). El siguiente evento debió ser de tipo explosivo por la gran cantidad de material volcánico expulsado, ocasionando probablemente el vaciado parcial de la cámara magmática y el colapso del techo de la misma, originándose así la caldera de Los Humeros (Lermo, *et al.*, 2008). Posteriormente, sucedieron una serie de derrames de andesita basáltica y la emisión de grandes cantidades de pómez que cubrieron a la región (0.08 a 0.04 Ma). La fase final de la actividad volcánica del área está representada por derrames de composición basáltica que muestra una estrecha relación con el origen de la caldera del Xalapasco (Lermo, *et al.*, 2008).

Tectónicamente, el Campo Geotérmico Los Humeros, presenta tres estructuras caldéricas, Los Humeros, Los Potreros y el Xalapasco, formadas en los diferentes eventos volcánicos.

Estudios geofísicos de reflexión sísmica, gravimetría y transitorio electromagnético (TDM), revelaron también la existencia de sistemas de fallas normales orientados principalmente en las direcciones NW-SE (Malpaís, Antigua, Los Humeros, Nueva, Imán), NE-SW (Pamela, Morelia, Parajes) y E-W (Las Papas). La falla Los Humeros es la única que puede ser observada en superficie y de acuerdo a los estudios de reflexión sísmica está conectada en profundidad con el yacimiento. A través de ella ascienden fluidos de alta temperatura hasta la superficie para dar lugar a las manifestaciones termales. Asimismo, los análisis estructurales realizados en la falla Los Humeros muestran un movimiento de tipo normal con echado hacia el este (Lermo, *et al.*, 2008).

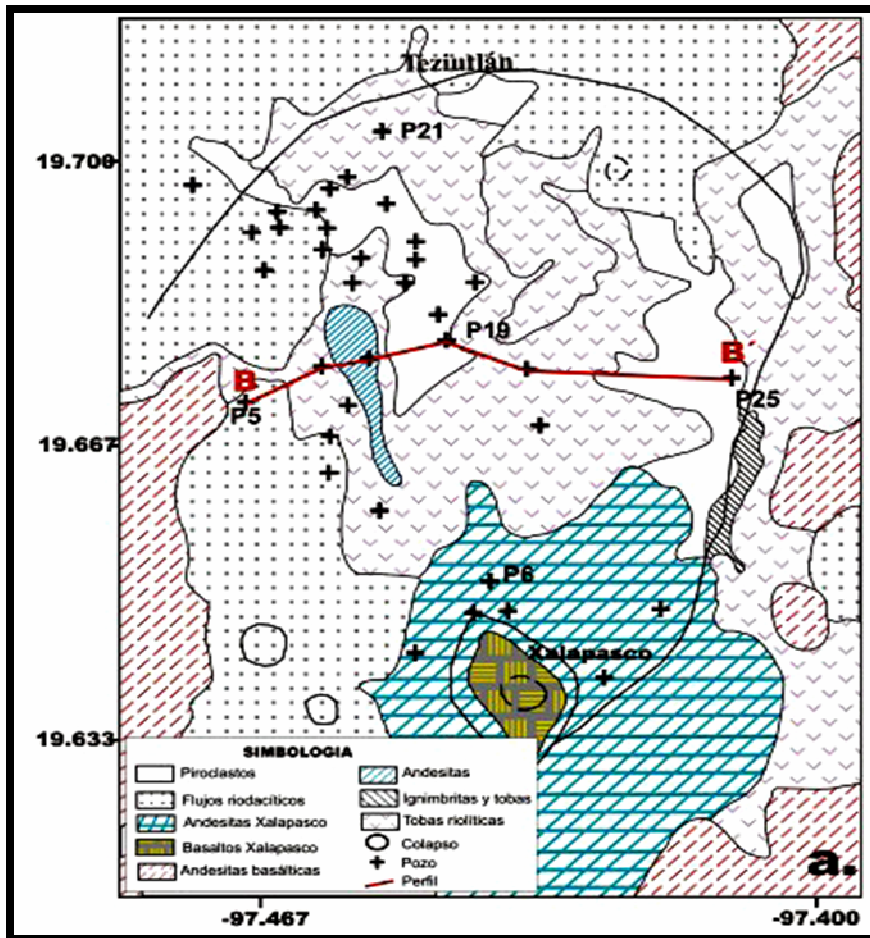


Figura V.15 Principales productos volcánicos depositados en el Campo Geotérmico Los Hornos (Tomada de Lermo, et al., 2008).

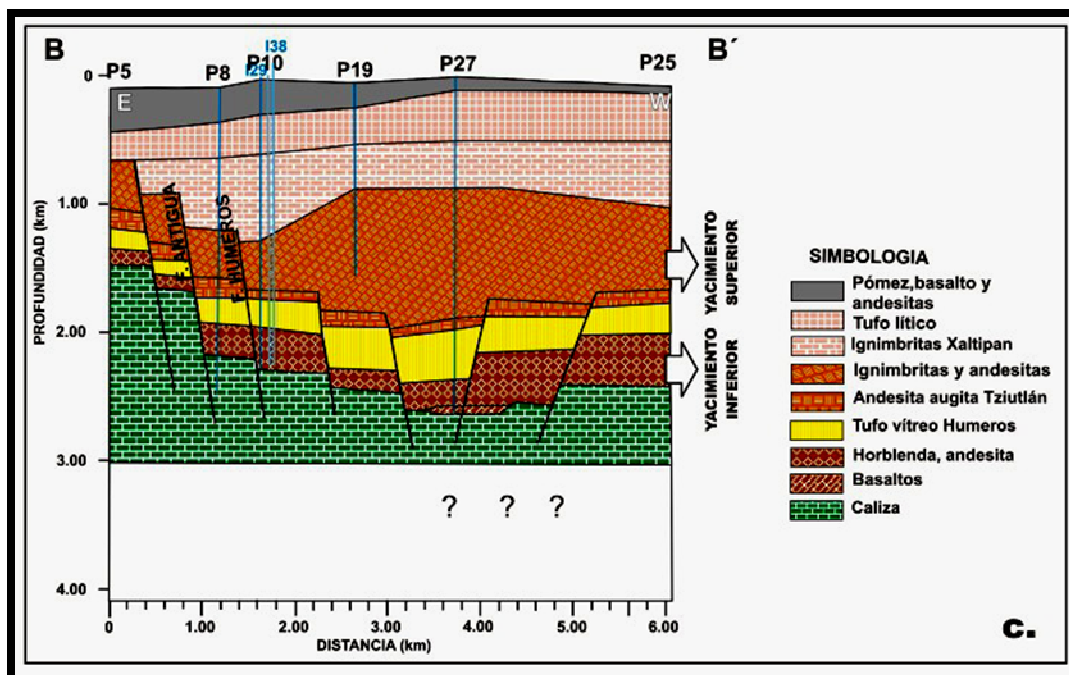


Figura V.16 Perfil estratigráfico orientado en dirección E-W del Campo Geotérmico Los Hornos según la Figura V.15 (Tomada de Lermo, et al., 2008).

La perforación de los pozos en el CGLH ha permitido la identificación de 9 unidades estratigráficas del subsuelo, así como la definición de dos probables yacimientos geotérmicos, uno superior formado por andesitas e ignimbritas y otro inferior compuesto por andesitas y basaltos que están separados por una capa confinante de toba vítrea. La Figura V.16 muestra el perfil estratigráfico representativo B-B' del CGLH, orientado en dirección este-oeste (E-W) según la Figura V.15 (Lermo, et al., 2008).

La central geotermoeléctrica de Los Humeros está constituida por ocho unidades turbogeneradoras a contrapresión de 5 MW cada una (40 MW en total). En 2001 las tres unidades que estuvieron en operación continua generaron 127 GWh, y fueron alimentadas por casi 2 millones de toneladas de vapor, producidas por un promedio de 9 pozos productores integrados al sistema. Estos pozos producen una cantidad menor de salmuera que los pozos de los otros campos. Durante 2001 la salmuera producida fue de 870 mil toneladas, la que se inyectó al yacimiento a través de dos pozos inyectoros.

V.3.4 LAS TRES VÍRGENES, BAJA CALIFORNIA SUR

La Región del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes y por tanto del campo geotérmico del mismo nombre, se encuentra ubicado en el extremo oriental de la península de Baja California Sur, entre las coordenadas 27.40° N a 27.59° N y 112.40° W a 112.67° W (Fig. V.17). Colinda al noroeste con el poblado de San Ignacio y al sureste a 35 Km con el poblado de Santa Rosalía. Al oeste se localiza el mar de Cortés.

Esta región presenta una geología y tectónica muy particular debido principalmente a la presencia del complejo volcánico compuesto de tres volcanes. El desarrollo de este complejo permitió la presencia de yacimientos geotérmicos económicamente rentables, por lo que en la actualidad el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, está en explotación.

En el contexto regional, el Sistema Geotérmico Las Tres Vírgenes se localiza en la depresión plio-cuaternaria de dirección NW-SE en la denominada Cuenca de Santa Rosalía, que constituye el límite de una zona de deformación relacionada con la apertura del Golfo de California; el borde occidental de la cuenca es cortado por un sistema de fallas orientadas NW-SE. Existen tres estructuras volcánicas cuaternarias, la Caldera La Reforma, la Sierra Aguajito y el complejo Las Tres Vírgenes. Es en este complejo que se localizan los tres estratovolcanes de edad cuaternaria: La Virgen, El Azufre y El Viejo (Venegas, et al., 2006).

Dentro del complejo de Las Tres Vírgenes, los tres volcanes cuaternarios están alineados de norte a sur, y la fuente de calor parece estar relacionada con la cámara magmática del volcán más reciente denominado La Virgen. En esta porción de México el vulcanismo es un producto de los movimientos

tectónicos que están separando a la península de Baja California del resto del continente, a razón de unos 5 centímetros por año, a lo largo de una zona de fallas de transformación que constituyen la prolongación sur del sistema de San Andrés.

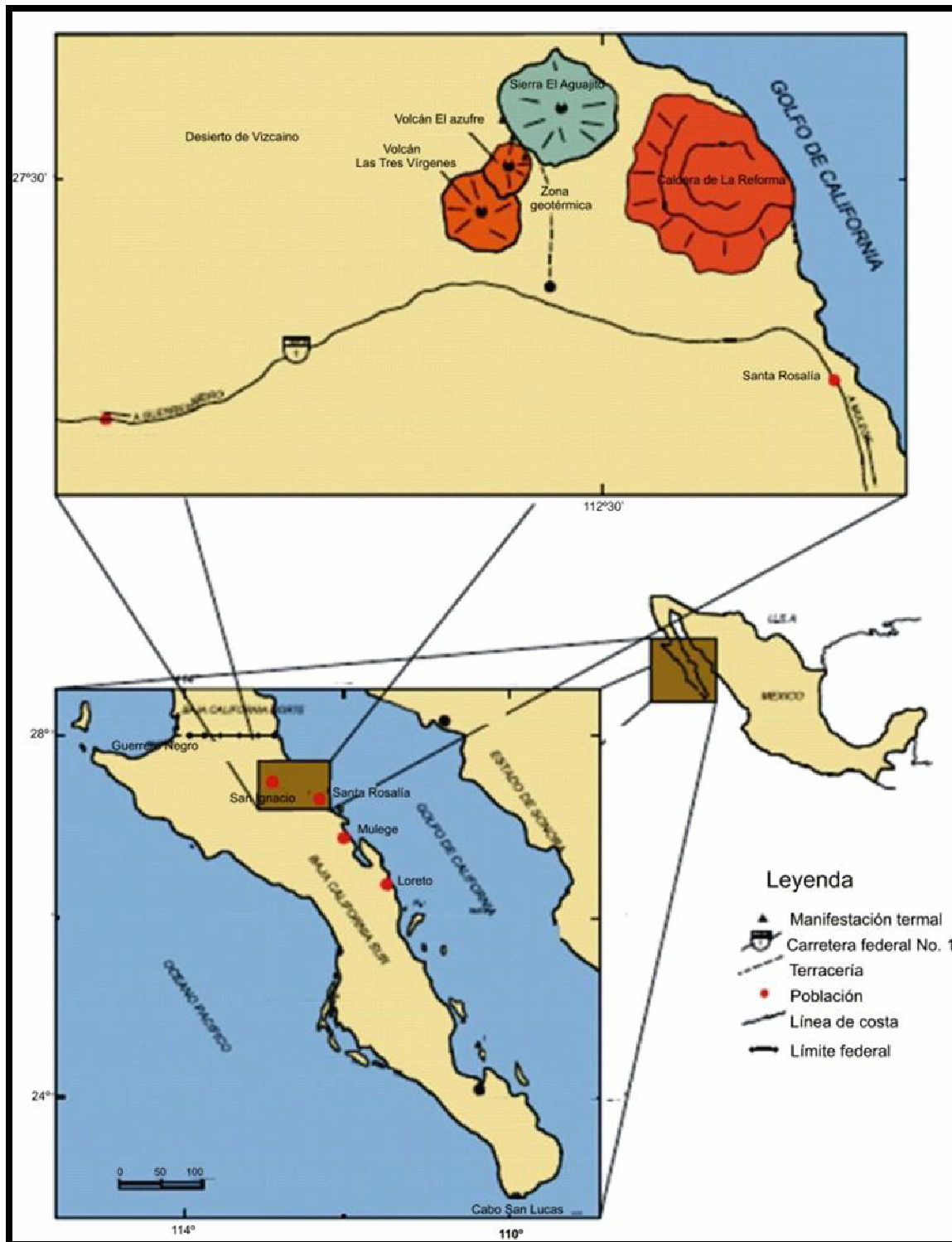


Figura V.17 Localización del campo geotérmico Las Tres Virgenes (Tomada de Venegas Salgado, et al., 2006).

La geología del subsuelo muestra un basamento granítico del Cretácico, con una edad de 80 Ma; a este lo sobreyace el Grupo Comondú, que es una secuencia vulcano-sedimentaria con un espesor máximo de 750 m, cuya edad comprende del Oligoceno Tardío al Mioceno Medio (Ortiz y Lorenzo, 2009).

Sobre el grupo anterior se encuentra la formación Santa Lucía, cuyo espesor máximo es de 300 m, y está compuesta por derrames del volcán El Azufre alterados a profundidad, ignimbritas y sedimentos marinos de edad del Mioceno Tardío al Cuaternario Temprano. Encima de esta se encuentran sedimentos marinos de la Cuenca Santa Rosalía, de 54 m a 258 m de espesor, formados por conglomerados y areniscas, con dacitas submarinas. Le sobreyacen las Ignimbritas Aguajito, de 3 m a 187 m de espesor, las ignimbritas y dacitas El Viejo (de 65 m a 213 m de espesor) compuesta por dacitas de augita, además de andesitas del complejo Las Tres Vírgenes con depósitos aluviales (Ortiz y Lorenzo, 2009).

Además de los volcanes, la manifestación estructural predominante en el área es el conjunto de fallas con dirección NW-SE (Figura V.18). De éstas, la que está más hacia el NE es la Falla El Azufre, que en general corre a lo largo de la depresión topográfica entre el Volcán El Viejo al SW y el complejo Aguajito al NE. La falla más al SW es la Falla La Virgen, que pasa a través de la parte superior del Volcán La Virgen (Venegas, et al., 2006).

La anomalía térmica coincide en general con la intersección de este sistema de fallas de tendencia NW-SE con el Sistema Cimarrón de tendencia N-S (Teyssier, 1990), que comprende la Falla Cimarrón además de otras varias fallas y/o fracturas con tendencia N-S. Estas fallas han sido localizadas en detalle en mapas, sobre todo en las áreas de manifestaciones termales y en los pozos profundos del norte, aunque la mayor extensión de ambos sistemas de fallas está enterrada debajo de rocas volcánicas jóvenes. Según esto, muchas de las trazas de fallas son inferidas.

El mayor desplazamiento en ambos sistemas de fallas tiene fecha anterior a la formación de Las Tres Vírgenes, y sólo pequeños movimientos han continuado durante tiempos más recientes. Algunos de estos desplazamientos cortan las Dacitas El Viejo, y quizás las rocas más jóvenes de los volcanes El Azufre y Las Tres Vírgenes. El sentido y magnitud del desplazamiento de las diferentes fallas es variable y no siempre se ha cuantificado.

Si bien los mapas de la geología superficial y los correspondientes cortes transversales no muestran estructuras importantes con tendencia NE-SW, interpretaciones de gravimetría han sugerido que la conexión estructural entre la Falla El Azufre y la Falla La Virgen ha creado varias fallas con tendencia NE-SW que están enterradas debajo de la superficie volcánica. Probablemente estas fallas forman los linderos SE y NW del yacimiento geotérmico, y también

puede ser que hayan creado parte de la permeabilidad por fracturamiento dentro del yacimiento (CFE, 1998b).

Los fluidos geotérmicos del yacimiento están alojados en rocas de tipo intrusivo (granodioritas), sobreyacidas por rocas vulcanosedimentarias y volcánicas. La CFE ha perforado en el campo varios pozos, cuatro de los cuales son productores y dos inyectores. A mediados de 2001 empezaron a operar las primeras dos unidades turbogeneradoras a condensación de 5 MW cada una (10 MW en total), constituyendo así la central geotermoeléctrica de Las Tres Vírgenes.

V.3.5 CERRITOS COLORADOS, JALISCO

Un quinto campo geotérmico identificado con gran potencial de energía geotermoeléctrica en México, es el campo Cerritos Colorados, conocido anteriormente como La Primavera, está ubicado en la porción central del país al occidente de la Faja Volcánica Mexicana (Fig. V.18) y prácticamente en la periferia de la ciudad de Guadalajara, capital del Estado de Jalisco.

El campo se ubica dentro de una caldera volcánica de unos 12 kilómetros de diámetro formada hace 120 mil años, la caldera La Primavera, cuya última actividad volcánica formó un domo riolítico de 20 mil años de antigüedad extruido en el borde oriental de la caldera. La fuente de calor es la cámara magmática productora del vulcanismo, que se localiza en el subsuelo hacia la porción centro-sur de la caldera. Los fluidos geotérmicos están contenidos en rocas andesíticas plio-cuaternarias a profundidades del orden de los 2,100 metros, sobreyacidas por ignimbritas y sedimentos lacustres y subyacidas por rocas intrusivas que constituyen el basamento.

La CFE ha perforado en ese campo 13 pozos exploratorios, seis de los cuales son pozos productores. Aunque se ha evaluado un potencial inicial suficiente para instalar 75 MW, por ejemplo, con tres unidades a condensación de 25 MW cada una, hasta la fecha el campo no ha podido ser aprovechado por carecerse de los permisos y licencias en materia ambiental.

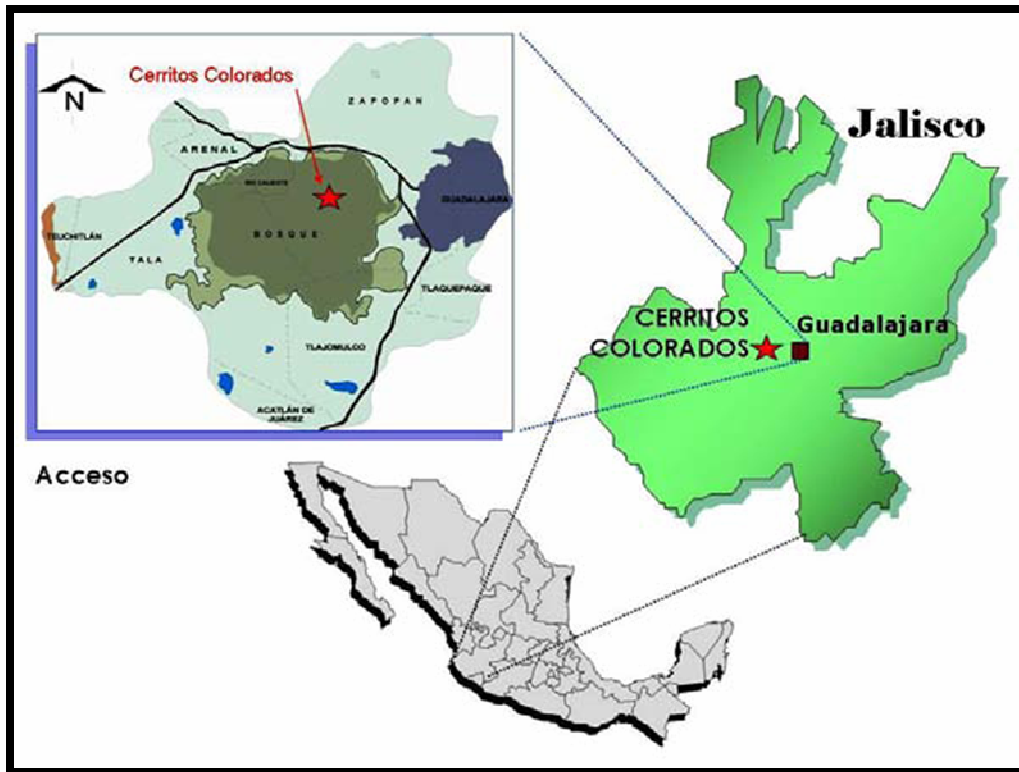


Figura V.18 Localización del campo geotérmico Cerritos Colorados (Tomado de Molina, et al., 2006).

V.4 SITUACIÓN ACTUAL

La energía geotérmica es una opción técnica y económicamente madura, ya que a partir de 1913 se ha estado generando electricidad comercialmente, a escala industrial. En la actualidad, 24 países cuentan con plantas geotermoeléctricas, con una capacidad instalada total de 9,829 MWe. Se estima que para 2010 podría haber 10,993 MWe instalados. Por otro lado, al menos 72 países explotan comercialmente el calor geotérmico en forma directa, con instalaciones que totalizan 28,268 MWt (Arellano, et al., 2008).

México cuenta con más de 40 años de experiencia generando energía geotérmica y en la actualidad la genera en cuatro campos geotérmicos: Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros y Las Tres Vírgenes. A continuación, se presenta la perspectiva tecnológica para los sistemas de baja, intermedia y alta temperatura en México.

Los *recursos de temperatura intermedia a baja (150°C - 90°C)*. Los recursos geotérmicos de este tipo son mayormente útiles para aplicaciones directas del calor, tanto domésticas como industriales. Cabe aclarar, sin embargo, que los recursos con temperatura mayor que 150°C se pueden utilizar para la generación eléctrica, aunque la eficiencia del proceso en este caso no es particularmente atractiva (Iglesias, et al., 2005).

En rangos de temperatura más baja, se utilizan mayormente en balnearios termales, aunque existen algunas otras aplicaciones en pequeños proyectos de demostración, implementados por la Comisión Federal de Electricidad, actualmente su uso es reducido.

Con la capacidad instalada actual, la estimación mínima de reservas que se ha hecho de estos recursos, es de 2.14×10^{10} a 2.39×10^{10} MWth, que alcanzaría para más de 15,000 años (Iglesias, et al., 2005).

Aunque actualmente en México las aplicaciones directas se enfocan casi exclusivamente a balnearios, la comunidad geotérmica internacional ha desarrollado una considerable cantidad de posibilidades de aplicación. Desde luego, por razones termodinámicas, el tipo de aplicación posible depende de la temperatura del recurso disponible.

En relación a los *recursos de alta temperatura*, en los campos mexicanos operan 36 unidades geotermoeléctricas de diversos tipos (con capacidades que van de 1.5 a 110 (MWe). Estas plantas son alimentadas por 197 pozos que tienen profundidades entre 600 y 4,400 m, y que producen 7,700 toneladas de vapor y 8,750 toneladas de salmuera por hora.

La generación de electricidad por medio de plantas geotermoeléctricas es una realidad en México, y se estima que para el año 2010 se contará con una capacidad instalada de 1,178 MWe, debido a la aprobación de los proyectos Cerro Prieto V (100 MWe) y Los Humeros II (46 MWe). El proyecto Cerritos Colorados (75 MWe), antes La Primavera, aún no tiene fecha programada para su explotación comercial (Arellano, et al., 2008).

México no tiene dependencia tecnológica en la exploración, desarrollo y explotación de recursos geotérmicos, más bien se ha exportado y se exporta tecnología geotérmica al extranjero. Los técnicos mexicanos han participado en estudios y proyectos en países como Argentina, Bolivia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Estados Unidos, Guatemala, Haití, Jamaica, Nicaragua, Panamá, Perú y República Dominicana (Arellano, et al., 2008).

Las aplicaciones actuales en México y en el mundo utilizan exclusivamente recursos geotérmicos hidrotermales, pero se considera que en el corto o mediano plazo también será posible utilizar recursos de roca seca caliente (HDR), por lo que actualmente se está desarrollando tecnología apropiada. En un plazo más largo también será posible utilizar los recursos geopresurizados, los geotérmicos marinos y la energía térmica de yacimientos de magma; su posible aprovechamiento depende tanto del desarrollo de tecnologías y materiales apropiados, como de las variables económicas que determinan la competitividad de los diversos recursos energéticos.

CONCLUSIONES

- El objetivo primordial de este trabajo se ha cumplido, ya que se ha presentado un panorama general de lo que es la geotermia, en un nivel aceptable para los alumnos de Ingeniería Petrolera, con un lenguaje sencillo que es entendible ya que de acuerdo al plan de estudios, ya se han cursado dos materias referentes a Geología, además, ha quedado demostrada la importancia de la geotermia como una importante fuente alterna de energía, y es precisamente alrededor de ésta que se derivan las siguientes conclusiones.
- Los combustibles fósiles se están agotando, su consumo ha causado mucho daño al medio ambiente debido a su uso excesivo e inapropiado y eso que comparado con la historia del hombre, ha sido poco el tiempo que se han empleado, por lo que es muy recomendable reemplazar dentro de lo posible a los hidrocarburos por otras fuentes de energía limpias.
- El problema de abastecimiento de energía tanto en México como en el mundo está resultando ser un problema grave, por lo que la geotermia es una fuente de energía que contribuye a satisfacer esa demanda.
- La energía geotérmica es la energía en forma de calor proveniente del interior de la Tierra, es producida por factores de tipo magmático, radiométrico, mecánico y/o químico, dicha energía es susceptible de ser aprovechada, sin embargo, tiene la limitante de que no puede ser transportada.
- La fuente más importante de generación de calor, proviene de la desintegración de isótopos radiactivos de vida larga, principalmente los isótopos U^{235} , U^{238} , Th^{232} y el K^{40} .
- La energía geotérmica presenta características específicas que la perfilan como una de las opciones más viables para satisfacer parte de la demanda de energía no sólo en México, sino en el mundo, donde existen yacimientos geotérmicos.
- Las aplicaciones directas de la energía geotérmica en el país no están siendo utilizadas al máximo, están orientadas casi exclusivamente a balnearios, aún cuando la comunidad geotérmica internacional ha propuesto una gran cantidad de posibilidades de aplicación.
- En México las principales zonas geotérmicas se localizan fundamentalmente en las regiones central y occidental de la República Mexicana. Las regiones con mayor potencial están ubicadas específicamente hacia el sur de la Faja Volcánica Transmexicana, debido a la actividad volcánica reciente.

- A nivel mundial, México ocupa el cuarto lugar en capacidad geotermoeléctrica instalada, lo que lo hace ser uno de los países con mayor desarrollo geotérmico, Actualmente genera energía eléctrica en cuatro campos que son Cerro Prieto, Los azufres, Los Humeros y Las Tres Vírgenes, dichos campos están ubicados de la siguiente manera: el Campo Geotérmico Cerro Prieto, Baja California, está en el extremo noroccidental del país, muy cerca de la frontera con Estados Unidos; el Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes, está localizado en el extremo oriental de la península de Baja California Sur; por su parte, los campos de Los Azufres, Los Humeros y así como el de Cerritos Colorados (que ya está identificado pero aún no está en explotación), se ubican dentro de la porción central del país, dentro de la Faja Volcánica Transmexicana.
- A pesar de ser una muy buena opción como energía alterna, el uso que se le dé a la geotermia en México, debería de ser racional, considerando las consecuencias que traerá un uso inadecuado de esta fuente.

RECOMENDACIONES

- Los usos y aplicaciones que se le dan a la geotermia deberían ampliarse mucho más en México, mediante fuertes inversiones en la investigación y tecnología que permita la instalación de los mecanismos de aprovechamiento adecuados, ya que se ha comprobado el potencial geotérmico del país.
- Se recomienda que esta recopilación de información, no sólo sea usada como material de apoyo para la carrera de ingeniería petrolera en la asignatura de “Geología de Explotación del Petróleo, Agua y Vapor”, sino también para la de Ingeniería Geológica y Geofísica en la misma materia geotermia.
- Se recomienda considerar los temas aquí expuestos en el orden que se presentan, como base del temario de la asignatura “Geología de Explotación del Petróleo, Agua y Vapor”.
- Se recomienda que se dé a conocer esta información a los alumnos a fin de que tengan un panorama general del tema.

BIBLIOGRAFIA

- Adams, A.E., Mackenzie, W.S., Guilford, C., 1997, Atlas de rocas sedimentarias: Editorial Masson, 65.
- Aguayo, J.E., Trápaga R., 2001, Geodinámica de México y minerales del mar: Fondo De Cultura Económica, 1ª Edición, México, 105p.
- Aguilar, D. A., 2008, Análisis geológico-productivo enfocado a la exploración de la parte oriental del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, BC: Revista Geotermia, 21(1), 2-4.
- Aguilar, D.A., 2009, Áreas para exploración en los alrededores del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, BC: Geotermia, 22 (2), CFE, 2-5.
- Arellano, G.V., Iglesias, R.E., García, G.A., 2008, La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura: Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas Julio-Septiembre, 102-114.
- Arellano, V.M., García, A., Barragán, R.M., Izquierdo, G., Aragón, A., Pizano, A., 2000, Distribución inicial de presión y temperatura del Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla: Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas Julio- Agosto, 169-171.
- Beltrán, R.F., Luna, G.P., 1994, Estudio geológico de la región de Santa –María Amajac. Municipio de Atotonilco El Grande, Estado de Hidalgo: Tesis de Licenciatura, UNAM.
- Bertani, R., 2005, World geothermal generation 2001-2005: State of the art. proc. of the world geothermal congress, Antalya, Turkey, april 2005.
- Blatt, H., Middleton Gerard., Murray Raymond., 1980, United States Origin of sedimentary rocks: N. J., Prentice Hall, 782p.
- Bulbulian, S., 1995, La radiactividad: Fondo de cultura económica, 124p.
- Buntebarth, G., 1994, Geotermia, introducción a los aspectos aplicados y teóricos de la conducción del calor en la Tierra: Conacyt, México, 184p.
- Campoblanco, D.H., Gomero, T.J., 2000, Mareas rojas o purgas químicas asociadas a niños tectónicos: Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Ing. Geologica, Minera, Metalurgica y Geográfica, Lima, Perú, 3(6), 51-54.
- Cardemil, I.J.M., 2006, Modelación del flujo bifásico en un pozo geotérmico: Tesis de licenciatura, Universidad de Chile, 13-16.

- Castany, G., 1988, Tratado práctico de las aguas subterráneas: Ediciones Omega S.A. 115-123.
- Cedillo, F., 2000, Hydrogeological model of the geothermal reservoirs from Los Humeros, Puebla, México: Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan. May 28-June 10, 1639-1644.
- Comisión Federal De Electricidad, 1998b, Proyecto Geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S., Estado Actual, CFE, Informe Interno No. JP-LTV-012-98. Inédito.
- Cruz, C.M., 2002, Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México: Informe Interno del Instituto Mexicano del Petróleo, México. Inédito.
- Dickson, H.M., Fanelli, M., 2004. What Is geothermal energy?: Istituto di geoscienze e georisorse, Cnr , Pisa, Italy, 61p.
- EIA, 2006, International Energy Annual 2006 Report Energy Information Administration, EUA.
- EIA, 2008, International Energy Annual 2008 Report Energy Information Administration, EUA.
- Garcia, R.J.M., Villasuso, R., Ayora, C., Canals, A., Otálora, F., 2007, Formación de megacristales naturales de yeso en Naica, Mexico: Boletín Sociedad Geologica Mexicana, LIX (1), 64-65.
- Garnish, J.D., 1987, Proceedings of the first EEC/US Workshop on geothermal hot-dry rock technology: Geothermics, 16, 323-461.
- González, P.E., 1999, Comportamiento de fluidos en un sistema hidrotermal: actual caso Los Azufres, Michoacán, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 6 (2), 208-211.
- González, P.E., 2000, Evidencias de evolución de un fluido básico a ácido a partir del análisis de la alteración hidrotermal del Campo Geotérmico Los Azufres, Michoacán: Revista Mexicana de ciencias geológicas 17 (1), .77-78.
- González, P.E., 2001, Especies sulfurosas del sistema hidrotermal actual del Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán: Distribución y comportamiento isotópico: Revista Mexicana De Ciencias Geológicas, 18(1), 103-104.
- González, P.E., Vassallo, F.L., 2001, Geoquímica de elementos mayores de los cuerpos intrusivos terciarios de Tierra Caliente, Edo. de México, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LIV, 1-3.

- Gutiérrez, N.L.C.A., 1982. Litología y zoneamiento hidrotermal de los pozos H 1 Y H 2 del Campo Geotérmico de Los Humeros, Puebla: CFE, Informe Interno 23/82, Depto. Exploración. Inédito.
- Gutiérrez, N.L.C., 2002, Recursos geotérmicos de Mexico: Simposio Internacional de Geología Ambiental para planificación del uso del territorio, Puerto Varas, 4-6 de Noviembre 2002.
- Gutiérrez, N.L.C.A., Quijano-León, J.L., 2005, Update Of Geothermics In México: Proc. of the world geothermal congress, Antalya, Turkey, April 2005.
- Iglesias, R.E., Arellano, G.V., Torres, R.R.J., 2005, Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la geotermia en México: Instituto de Investigaciones Eléctricas, 60p.
- INEGI, 1998, Anuario estadístico del Estado de México, edición 1998.
- INEGI, 2007, Anuario estadístico de Querétaro de Arteaga, edición 2007.
- INEGI, 2008, Anuario estadístico de San Luis Potosí, edición 2008.
- INEGI, 2008, Anuario estadístico de Michoacán de Ocampo, edición 2008.
- Leibar, I., 2003, Climatización geotérmica: Rehabitar, 9, Asociación De Estudios Geobiológicos (GEA) España, 12.
- Lermo, J., Antayhua, Y., Quintanary, L., Lorenzo, C., 2008, Estudio sismológico del Campo Geotérmico de los Humeros, Puebla, México. Parte I: sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos: Geotermia, 21(1), CFE, 25-41.
- Lira, H.H., 2005, Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento Cerro Prieto, B.C: Revista Geotermia, 18(1), 37-40p.
- López, R.O., 2006, Actualización del modelo geoquímico de los Humeros, Puebla, México: Revista Geotermia, CFE, 19 (1), 23-24.
- Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T. 2005, World wide direct uses of geothermal energy 2005: Proc. of the world geothermal congress, Antalya, Turkey, April 2005.
- Magistrale, H., 2002, The relation of the southern San Jacinto fault zone to the Imperial and Cerro Prieto Faults. In: Barth, A., Ed., Contributions to crustal evolution of the southwestern United States, Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 365, 271-278.

- Maya, G.R., Gutiérrez, N.L.C.A., 2007, Recursos geotérmicos para generar electricidad en México: Revista Digital Universitaria, 8 (12) 2007, 1-6.
- Mengelle, L.J.J., 2007, El sistema hidrotermal fósil de Caopas, Zacatecas: Documento de geología de yacimientos minerales, Escuela Superior de ingeniería y arquitectura. Unidad Ticomán, Gym-01.
- Mercado, S., Arellano, M.V., Barragán, R.M., 2007, Medio ambiente, geotermia y toma de conciencia: Revista Geotermia, 20(2), CFE, 77-86.
- Molina, A.III., Honda M., El-Qady G., Ushijima, K.eisuke., 2006, Exploration of the geothermal reservoir of Cerritos Colorados, Jalisco, Mexico, using 1-d and 2-d inversion of resistivity data: Revista Geotermia, 19(1), CFE, 2-8.
- Ortiz, P.I., Lorenzo, P. C., 2009, Quince años de monitoreo sísmico en el Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S.: Revista Geotermia 22 (2), CFE, 28-30.
- Pantoja, A.J., Gómez, C.A., 2004, Sistemas Hidrotermales y el origen de la vida: Ciencias, 075, julio-septiembre, UNAM, 14-18.
- Pérez, R.J., 1978, Geología y petrografía de Los Humeros: Geomimet, 91, 97-106.
- Pollack, H.N., Hurter, S.J., Johnson, J.R., 1993. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. rev. geophys. 31, 267-280.
- Portugal, E., Barragán, R.M., Izquierdo, M. G., Romero, I.B., 2002, Modelación del equilibrio químico de las aguas termales de Las Tres Vírgenes, B.C.S, México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Prol, L.R.M., 1995, El calor de la Tierra: Fondo de cultura económica, México, 99p.
- Quijano, L.J.L., 2007, Manual de geotermia, ciencias de la Tierra e ingeniería de reservorios.
- Reyes, F.A., 1987, La geotermia, una alternativa energética: Tesis de licenciatura, UNAM, 287-297.
- Secretaría de Energía, 2008, Perspectiva del Sector Eléctrico 2005-2014.
- Skoog, A.D., James, H.F., Crouch, S.R., 2008, Principios de Análisis Instrumental: Cengage Learning, 6ª Ed. 935p.
- Smith, J.P., Gass, I.G., Wilson, R.C.L., 2002, Introducción a las ciencias de la Tierra: Editorial Reverté, 428p.

- Stacey, F.D., Loper, D.E., 1988. Thermal history of the Earth: A corollary concerning non-linear mantle rheology. *phys. Earth. planet. inter.* 53, 167 - 174.
- Stefansson, V., 2005, Geothermal assessment: Proc. of the world geothermal congress, Antalya, Turkey, April, 2005.
- SGM, Servicio Geológico Mexicano, Carta geológica Santa María del Rio SLP, Río F14-C14, S.L.P.-Gto., Esc. 1:50,000.
- Tarback, J.E., Lutgens, K.F., 2000, *Ciencias de la Tierra*: Prentice Hall, 6ª Ed. 540p.
- Teyssier, C., 1990, Geothermal project Las Tres Vírgenes, Baja California, a structural geology report. Department of geology and geophysics, University Of Minnesota, Minneapolis. Inédito.
- Tenzer, H., 2001. Development of hot dry rock technology: *Bulletin geo-heat Center*, 32 (4), 14-22.
- Torres, R.V., Coord., Arellano, G.V., Barragán, R.R.M., González-Partida, E., Herrera, F.J.J., Santoyo, G.E., Venegas, S.S., Colabs, 1993, *Geotermia en México: Documentos de análisis y prospectiva del programa universitario de energía*, UNAM, 1 p.
- Vázquez, O.I., 1999, *Cronista Municipal de Tonalico: Monografía Municipal de Tonalico*, México.
- Venegas, S., Arredondo, F.J., Ramírez, S.G., Flores, A.M., Ramírez, M.M., 2006, Monitoreo sísmico durante la estimulación ácida de los pozos LV-4 Y LV-13 del Campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, México: *Revista Geotermia*, 19(2), 13-16.
- Viggiano, J.C., Robles, J., 1988, Mineralogía hidrotermal en el Campo Geotérmico de Los Humeros, Puebla, Tomo I: Sus Usos Como indicadora de temperatura del régimen hidrológico: *Revista Geotermia*, 4, 24-33.
- Yáñez, G.C., García, D.S., Casique, V.J. 1979. Geothermic Exploration in the Los Humeros-Derrumbadas Area: *Geothermic Research Count. Trans*, 3, 801-803.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Aguilera, O.E., 2009, La vigilancia volcánica y la predicción de las erupciones:

<[http:// www. publiespe.espe.edu](http://www.publiespe.espe.edu)>

Asociación geotérmica mexicana:

<<http://www.geotermia.org.mx>>, consulta: 4 de agosto de 2009.

Ayuntamiento de Hidalgo, 2005:

<[http:// www.e-local.com](http://www.e-local.com)>

Blogger.com, imagen capas Tierra:

<http://bp0.blogger.com/_VPJGM-cdFZg/SF0PiwwOT6I/AAAAAAAAAB8/qeBOgNIqdol/s1600-h/tiirr.jpg>

Blogger.com, imagen de límites entre placas:

<<http://gfrojas.blogspot.com/2008/07/la-tecnica-de-placas.html>>

Centro de geociencias, UNAM., 2007:

< http://www.geociencias.unam.mx/gis_geol_2007.htm>

Estadísticas Pemex 2009:

<<http://www.sener.gob.mx/webSener/portal/index.jsp?id=380>>

Instituto Geológico de España:

<<http://www.igme.es>>

Michoacán, imagen:

< <http://www.michoacan-travel.com>>

Sagan, 2008:

<[http:// www.sagan-gea.org](http://www.sagan-gea.org)>

Volcán de Colima, imagen:

<<http://www.ucol.mx/volcan/>>

Spitzer, 2008, Imagen de la Tierra en infrarrojo:

<[http:// www.spitzer.caltech.edu/espanol/learn_ir/](http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/learn_ir/)>

