



Evaluación de la Energía Geotérmica en México

**Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la
Comisión Reguladora de Energía**

México, DF, mayo de 2011

Preparado por:
Dr. Gerardo Hiriart Le Bert

Con la colaboración de:
Ing. Luis C.A. Gutiérrez Negrín, Fís. José Luis Quijano León, Lic. Armando Ornelas Celis, Ing. Salvador Espíndola, Ing. Isaías Hernández

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
GLOSARIO.....	2
1. RECOPIACIÓN DEL INVENTARIO DE LAS ZONAS GEOTÉRMICAS DE MÉXICO.....	9
1.1. ESTIMACIONES PREVIAS DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO A PARTIR DE RECURSOS HIDROTERMALES.....	9
1.2. MÉTODO DE TRABAJO PARA ESTE NUEVO ESTUDIO	12
1.2.1. Modelo volumétrico con simulación Montecarlo.....	12
1.2.2. Modelo de descompresión gradual con Montecarlo.....	16
1.3. ZONAS CON RECURSOS GEOTÉRMICOS HIDROTERMALES	18
ZONA GEOTÉRMICA DE LA SOLEDAD, JAL.....	21
ZONA GEOTÉRMICA DE LAS PLANILLAS, JAL.	25
ZONA GEOTÉRMICA DE PATHÉ, HGO.....	29
ZONA GEOTÉRMICA DE ARARÓ, MICH.	33
ZONA GEOTÉRMICA DE ACOCULCO, PUE.	37
ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICH.....	41
ZONA GEOTÉRMICA DE LOS NEGRITOS. MICH.	45
ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN CEBORUCO, NAY.....	49
ZONA GEOTÉRMICA DEL GRABEN DE COMPOSTELA, NAY.	53
ZONA GEOTÉRMICA DE SAN ANTONIO EL BRAVO (OJINAGA), CHIH.....	57
ZONA GEOTÉRMICA DE MAGUARICHIC, CHIH.....	61
ZONA GEOTÉRMICA DE PURUÁNDIRO, MICH.	65
ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN TACANÁ, CHIAPAS.	69
ZONA GEOTÉRMICA DE EL ORITO-LOS BORBOLLONES, JAL.....	73
ZONA GEOTÉRMICA DE SANTA CRUZ DE ATISTIQUE, JAL.....	77
ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN CHICHONAL, CHIAPAS.	81
ZONA GEOTÉRMICA DE HERVORES DE LA VEGA, JAL.	85
ZONA GEOTÉRMICA DE LOS HERVORES-EL MOLOTE, NAY.....	89
ZONA GEOTÉRMICA DE SAN BARTOLOMÉ DE LOS BAÑOS, GTO.....	93
ZONA GEOTÉRMICA DE SANTIAGO PAPASQUIARO, DGO.	97
1.4. ZONAS CON RECURSOS DE ROCA SECA CALIENTE	101
1.5. POTENCIAL GEOTÉRMICO DE MÉXICO CON RECURSOS HIDROTERMALES SUBMARINOS	107
2. TÉCNICAS DE EXPLORACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS.....	109
2.1. TÉCNICAS GEOLÓGICAS.....	109

2.2. TÉCNICAS GEOFÍSICAS	112
2.2.1. Métodos eléctricos	113
2.2.2. Métodos gravimétricos	117
2.2.3. Métodos magnetométricos	119
2.2.4. Métodos sismológicos.....	120
2.3. TÉCNICAS GEOQUÍMICAS	122
2.3.1. Detección de elementos traza y gases del suelo	122
2.3.2. Muestreo y análisis químico de agua y gases	123
2.3.3. Muestreo y análisis isotópico de agua y gases	124
2.3.4. Interpretación de los resultados y diagramas geoquímicos	125
2.3.5. Geotermometría química e isotópica	127
2.4. TÉCNICAS TERMOMÉTRICAS	130
2.4.1. Mediciones superficiales de radiación térmica	131
2.4.2. Mediciones sub-superficiales de temperatura	131
2.4.3. Medición de gradiente y flujo térmico en pozos.....	131
2.4.4. Determinación de la descarga natural de calor	132
2.5. NUEVAS TECNOLOGÍAS DE EXPLORACIÓN	132
2.6. PROGRAMA GENERAL DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA	136
3. ASPECTOS LEGALES DE LA GEOTERMIA EN MÉXICO.....	139
3.1. ASPECTOS DE DERECHO COMPARADO EN MATERIA DE GEOTERMIA.....	139
3.2. SITUACIÓN JURÍDICA DE LA GEOTERMIA EN MÉXICO	139
3.3. LOS RECURSOS NATURALES EN LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS.....	141
3.3.1 La Reglamentación Constitucional del Subsuelo.....	142
3.3.2 Régimen Constitucional de las Aguas del Subsuelo.....	143
3.3.3 Ley de Aguas Nacionales.....	144
3.4. ESTADO JURÍDICO DE LA GEOTERMIA EN MÉXICO.....	145
3.5. LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON GEOTERMIA	147
3.5.1 Titularidad de la propiedad	148
3.5.2 Autorizaciones federales con diferentes dependencias en materia ambiental	148
3.5.3 En materia de agua	151
3.5.4 De otras secretarías de estado	153
3.5.5 Estatales o municipales.....	153
3.5.6 Comisión reguladora de energía.....	156
3.6. CONCLUSIÓN.....	158
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161

INTRODUCCIÓN

La Estrategia Nacional de Energía (ENE) es el marco de referencia general para el sector energético en México y, como se sabe, define tres ejes rectores: Seguridad Energética, Eficiencia Económica y Productiva, y Sustentabilidad Ambiental. A partir de ellos, en su versión más reciente se establecen ocho objetivos, el segundo de los cuales es: “Diversificar las fuentes de energía, incrementando la participación de energías limpias”. Para alcanzar este objetivo, la ENE define líneas de acción específicas y un indicador que permite evaluar si se está alcanzando o no. El indicador correspondiente a este objetivo es la meta de que la participación de las tecnologías limpias dentro de la capacidad eléctrica instalada del país ascienda al 35% para el año 2025. Para fines de diciembre de 2010, sólo el 26.4% de la capacidad instalada para el servicio público de energía eléctrica provenía de fuentes limpias (hidroeléctricas, nucleares, geotermia y viento), por lo que la meta implica incrementar en casi 9 puntos porcentuales la situación actual.

La geotermia es una fuente renovable que se ha utilizado en el mundo para generar energía eléctrica desde 1911, y en México desde 1959 cuando empezó a operar la primera unidad geotermoeléctrica en el país, con 3.5 MW de capacidad, en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, actualmente fuera de operación. Puesto que el país cuenta con amplia experiencia en la generación geotermoeléctrica y, a través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), opera actualmente 38 unidades con una capacidad instalada total de 958 MW, es evidente que un mayor desarrollo de la geotermia puede incidir sustancialmente en la consecución de la meta mencionada.

Siendo la Comisión Reguladora de Energía (CRE) la encargada, entre otras funciones, de promover el desarrollo eficiente de la generación de energía eléctrica por particulares, es muy importante para esta comisión determinar, así sea preliminarmente, el potencial geotérmico del país y revisar la situación regulatoria actual que constituiría el marco de referencia para el posible desarrollo de pequeños sistemas de generación con base en recursos geotérmicos, principalmente de temperaturas bajas e intermedias. Eso es lo que pretende el presente estudio.

Así, de acuerdo con los Términos de Referencia, el objetivo general de este estudio es: “Determinar el potencial geotérmico de México y las diversas regulaciones ambientales, de uso del agua y energéticas aplicables para el uso de la geotermia en la generación de energía eléctrica.” El primer capítulo del mismo, busca cumplir con el primero de los objetivos particulares enunciados en los mismos Términos de Referencia, que es recopilar “un inventario de las zonas geotérmicas existentes, incluyendo sus principales características: ubicación, contexto geológico, tipo de manifestaciones termales presentes, temperaturas superficiales y demás datos disponibles, y se definirá un potencial geotérmico general del país de manera preliminar. Cabe comentar que la determinación a fondo de los diversos tipos de potencial geotérmico en México (potencial teórico, potencial técnico y potencial económico) ameritaría un estudio ulterior más detallado.”

El segundo capítulo presenta una recopilación y evaluación de los métodos actuales de exploración geotérmica, cumpliendo así con el segundo de los objetivos particulares de los

Términos de Referencia. Como se sabe, los recursos geotérmicos se encuentran a diversas profundidades en el subsuelo y no siempre existen evidencias superficiales de su presencia, por lo que es preciso llevar a cabo métodos indirectos para tratar de encontrarlos y evaluarlos de manera preliminar. Por lo tanto, el capítulo dos presenta y comenta “los métodos de exploración geológica, geoquímica y geofísica aplicables, con énfasis en metodologías de vanguardia que se emplean actualmente en el mundo.”

Finalmente, el tercer capítulo está dedicado a la recopilación y evaluación de los aspectos regulatorios que enmarcan el desarrollo y aprovechamiento de los recursos geotérmicos en el país, según se establece en el tercero de los objetivos particulares incluidos en los Términos de Referencia. Por lo tanto, se presentan y comentan “los aspectos legales, reglamentarios y ambientales, tanto generales como específicos para la generación de electricidad y la perforación y operación de pozos de agua en México, así como para el desarrollo y explotación de sistemas geotérmicos.”

Debido a que en el cuerpo de este documento se utilizan ciertos términos y unidades que pueden no ser familiares para el lector promedio, a continuación se presenta un breve glosario con su descripción.

GLOSARIO

Bomba de calor: Instalación que transfiere calor de un lugar frío a uno caliente, de manera opuesta a la dirección natural de flujo de calor. De manera similar a un refrigerador, las bombas de calor se usan para extraer calor de ambientes como el suelo (bombas de calor geotérmico), el agua o el aire, y pueden invertir su funcionamiento para proveer enfriamiento en verano.

Calidad de vapor: En termodinámica, es una propiedad extensiva de los fluidos que representa la relación entre la cantidad de vapor en masa, con respecto a la cantidad total de fluido.

Calor recuperable: En ingeniería de yacimientos, fracción del calor disponible en el subsuelo que puede ser llevado técnica y económicamente a la superficie para su explotación.

Carga eléctrica: Demanda de electricidad de miles o millones de usuarios al mismo tiempo, más las pérdidas de energía en las líneas de transmisión y distribución, que debe suministrar un sistema integrado de suministro de energía eléctrica. La carga pico es la carga máxima de corta duración observada en un cierto periodo de tiempo (un día, una semana, un año). La carga base es la energía demandada de manera continua en ese periodo de tiempo, y representa la cantidad requerida para satisfacer la demanda mínima de acuerdo a una expectativa razonable de las necesidades de los usuarios.

CFE: Comisión Federal de Electricidad

Ciclo Kalina: Un tipo único de ciclo termodinámico que generalmente emplea una mezcla de agua y amoníaco como fluido de trabajo (en lugar de un fluido orgánico simple) y que, junto con varios recuperadores de calor, mejoran la eficiencia térmica del ciclo.

Ciclo Rankine: Una ciclo termodinámico que consiste en una serie cerrada de cuatro procesos: presurización de líquido, calentamiento- evaporación, expansión del vapor y enfriamiento-condensación. En la práctica hay diversas variantes del ciclo Rankine básico.

CNA: Comisión Nacional de Agua.

Cogeneración: Generación de energía eléctrica y aprovechamiento simultáneo del calor residual en un proceso industrial. En plantas geotermoeléctricas, se refiere al uso del agua caliente y/o vapor residual para aplicaciones directas que requieran calor. Sinónimo: Generación combinada de calor y electricidad (CHP: *Combined heat and power*).

Conductividad térmica: Propiedad de un material que mide su capacidad de conducir calor.

Consumo específico: En ingeniería geotérmica es la cantidad de vapor, en masa, que requiere una turbina para generar una unidad de potencia. Se representa comúnmente como CE y sus unidades son toneladas por megawatt (ton/MW).

Costo nivelado de energía: Costo unitario de generación expresado en pesos (u otra unidad monetaria) por kilowatt-hora, que iguala el valor presente neto (con una tasa de descuento dada) de los ingresos y de los costos durante la vida útil del proyecto. Incluye todos los costos de un proyecto (de inversión, de operación y mantenimiento, pero no el financiamiento).

Descompresión: Disminución de la presión de un volumen, regularmente relacionado con la extracción de masa o el enfriamiento.

Distribución normalizada: En estadística y probabilidad se llama distribución normal, distribución de Gauss o distribución gaussiana, a una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece en fenómenos reales.

Dominio de pertenencia: En probabilidad y estadística, es el conjunto total de valores que puede tomar una variable.

Eficiencia del ciclo: En termodinámica, es la relación entre la energía que entrega una máquina y el calor total disponible para la moverla.

Eficiencia térmica: Para un ciclo, es la relación entre la energía neta producida y la cantidad de calor introducida al ciclo.

EGS: Siglas de *Enhanced (or Engineered) Geothermal System*: Sistema geotérmico mejorado. Un sistema para recuperar energía primaria mediante tecnologías de extracción de calor, diseñado para extraer y utilizar la energía térmica almacenada en el interior de la Tierra.

Elemento finito: El método de los elementos finitos (MEF en español o FEM en inglés) es un método numérico, diferente al de diferencias finitas, que se usa para la aproximación de

soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

Energía interna: En ingeniería, la energía interna (U) de un sistema intenta ser un reflejo de la energía térmica que contiene. En física molecular, es la suma de la energía cinética interna (es decir, de las sumas de las energías cinéticas de las individualidades que lo forman respecto al centro de masas del sistema) y de la energía potencial interna (la energía potencial asociada a las interacciones entre estas individualidades).

Entalpia: Término utilizado por los ingenieros para denominar a la cantidad de calor útil que contiene un fluido. Es decir es la energía interna del fluido más el trabajo asociado a su expansión al momento de aprovecharlo. Generalmente se denomina con la letra H o h .

Estimulación: En sistemas tipo EGS, es el mejoramiento de la permeabilidad natural, o su creación cuando no hay ninguna. La estimulación se realiza usualmente por medios hidráulicos inyectando fluidos a tasas y presiones variables, o bien por medios químicos inyectando ácidos u otros compuestos para disolver partes de la roca en el subsuelo. La extensión de las fracturas mejoradas o creadas y su transmisibilidad final dependerán de los esfuerzos actuantes sobre las rocas y de sus propiedades térmicas y elásticas.

Factor de planta: Relación entre la generación real de una central eléctrica en un periodo de tiempo (usualmente un año) y la generación teórica que podría haber producido de acuerdo a su capacidad de placa si la unidad hubiera estado operando de manera ininterrumpida durante el mismo periodo de tiempo. En unidades geotermoeléctricas recientes el factor de planta típico es de 90% o mayor.

Fluido geotérmico: Cualquier fluido producido por un pozo geotérmico. Puede ser vapor seco o sobrecalentado, líquido presurizado o una mezcla de líquido y vapor saturado, acompañada usualmente de gases incondensables.

Fluido supercrítico: Fluido a condiciones de temperatura y presión por encima de su temperatura y presión críticas (374.14 para agua), por encima de las cuales no se distingue la fase líquida de la de vapor.

Flujo de calor, flujo térmico: Cantidad de calor que pasa por una superficie por unidad de tiempo y por unidad de área, cuando la superficie se somete a un diferencial de temperatura entre sus caras. Es proporcional al producto de la conductividad térmica por el gradiente térmico.

Flujo isoentálpico: En termodinámica, se considera como flujo isoentálpico al proceso en el cual no existe variación en el contenido energético total de un fluido.

Fracturamiento hidráulico: Técnica que implica la inyección de un fluido a elevada presión en un yacimiento para mejorar la permeabilidad natural existente y para establecer una conexión entre pozos, abriendo las fracturas selladas o creando nuevas para permitir que el fluido se mueva más libremente en la formación rocosa.

Función de probabilidad: En matemáticas es la función que asigna un valor para la posibilidad de que ocurra un fenómeno.

Gases no condensables: Gases tales como el bióxido de carbono, el ácido sulfhídrico, el metano y otros en muy pequeñas concentraciones que son constituyentes de los fluidos geotérmicos, como componentes gaseosos del vapor. Estos gases no se condensan a la temperatura normal de condensación del vapor y se acumulan en el condensador, reduciendo la generación de energía, a menos que se bombeen hacia afuera del condensador.

Geotermómetro: Ecuación empírica que relaciona el contenido de ciertos compuestos disueltos en el agua termal o de ciertos gases contenidos en el vapor superficial, con la temperatura de esos mismos fluidos en el subsuelo, lo que permite estimar las temperaturas de fondo probables en el yacimiento.

Gradiente geotérmico: Proporción en la cual se incrementa la temperatura de la Tierra con la profundidad, reflejando el flujo de calor del interior de la misma hacia su superficie. El gradiente geotérmico normal medio en la litósfera se estima entre 25 y 30°C por cada kilómetro de profundidad, pero puede ser mucho más alto en zonas geotérmicas.

Hidrotermal: En el contexto de un sistema geotérmico, se refiere a soluciones mineralizadas calentadas por contacto con rocas calientes y/o por magmas en enfriamiento, que sufren movimientos de convección en un yacimiento.

Intercambiador de calor: Equipo que logra una transferencia de calor eficiente entre uno y otro medio sin que estos se mezclen, por ejemplo: radiadores, calderas, intercambiadores de calor, condensadores.

Intervalo de confianza: En estadística, se llama intervalo de confianza a un par de números entre los cuales se estima que estará cierto valor desconocido con una determinada probabilidad de acierto. Formalmente, estos números determinan un intervalo, que se calcula a partir de datos de una muestra, y el valor desconocido es un parámetro poblacional. La probabilidad de éxito en la estimación se denomina nivel de confianza.

LAN: Ley de Aguas Nacionales.

LFAFE: Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos.

LFD: Ley Federal de Derechos.

LFT: Ley Federal del Trabajo.

LFTE: Ley Federal de Telecomunicaciones.

LGDP: Ley General de Deuda Pública.

LGEEPA: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

Litósfera: Capa sólida más externa de la Tierra compuesta por diversos fragmentos en movimiento denominados como placas tectónicas. Tiene un espesor medio de 50 km (mayor bajo los continentes y menor bajo los océanos) y está constituida por la corteza terrestre y la porción superior del manto.

LPCGPF: Ley de Presupuesto, Contabilidad y Gasto Público Federal.

Masa aprovechable: En ingeniería de yacimientos, es la cantidad de masa (vapor) que se obtiene del separador, y que realmente puede ser usada para la generación eléctrica

Masa recuperable: En ingeniería de yacimientos, es la cantidad de masa que puede ser extraída a la superficie de manera técnica y económica.

Media de la muestra: En matemáticas y estadística, la media aritmética (también llamada promedio o simplemente media) de un conjunto finito de números es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos. Cuando el conjunto es una muestra aleatoria recibe el nombre de media muestral siendo uno de los principales estadísticos muestrales.

Método de Montecarlo: Método probabilístico y estadístico para evaluar una función con variables aleatorias múltiples.

Modelo Volumétrico: Modelo matemático para evaluación preliminar del potencial de yacimientos, llamado también *Heat in Place*, desarrollado por el United States Geological Survey (USGS). Es el modelo simplificado más aceptado por la comunidad geotérmica internacional.

Muestra aleatoria: En probabilidad y estadística, es la selección al azar de un miembro de una población estadística.

NOM: Norma Oficial Mexicana.

Permeabilidad: Medida de la capacidad de los poros, grietas o aberturas de un material para permitir que los líquidos o gases fluyan a través de él bajo un gradiente de presión.

Porosidad: En geología, propiedad de una roca que cuantifica la cantidad de poros (espacios vacíos) que presenta, por unidad de volumen.

Potencia (Capacidad): Tasa a la cual se realiza un trabajo, expresado en unidades de joules por segundo (J/s) o watts (W) o sus múltiplos.

Potencial técnico: Cantidad de potencia obtenible con la implementación de tecnologías o prácticas que ya son actualmente utilizadas o que es probable que puedan ser utilizadas, sin tomar en cuenta costos, barreras o políticas.

Potencial teórico: Cantidad de potencia derivada de parámetros naturales y del clima (por ejemplo, la irradiación solar total en una superficie continental o el calor almacenado a cierta profundidad), que representa el límite superior de la potencia que puede producirse de un

recurso energético con base en principios físicos y el conocimiento científico actual. No toma en cuenta pérdidas de energía durante los procesos de conversión, ni posibles barreras.

Presión de separación: En ingeniería, en una central geotérmica es la presión a la que serán separadas las fases líquida y gaseosa en superficie antes de enviar el vapor a las turbinas para generar energía.

RIGVRP: Reglamento para la Inspección de Generadores de Vapor y Recipientes Sujetos a Presión.

RLFAFE: Reglamento de la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos

RLGEEPAA: Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera.

Saturación: En termodinámica y física de fluidos, un vapor saturado es aquel que se encuentra en equilibrio con su propia fase líquida, a una temperatura dada.

SCT: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

SEDENA: Secretaría de la Defensa Nacional.

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SGPA: Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental.

SHCP: Secretaría de Hacienda y Crédito Público.

STPS: Secretaría de Trabajo y Previsión Social

Tectónica: Rama de las Ciencias de la Tierra que trata con las características y movimiento de las placas que componen la litósfera, y que resulta en la creación y deformación del magma y de las rocas.

Transmisibilidad: Capacidad de un yacimiento para permitir el flujo de un fluido a través de un área determinada, generalmente en dirección horizontal. Es producto de la permeabilidad y del espesor de la formación a través de la cual fluye el fluido. En sistemas geotérmicos la transmisibilidad suele ser muy elevada, con valores mayores de 100 darcy-metros, comparada con la de los yacimientos petroleros donde es de cien a mil veces menor.

Turbina: Equipo que convierte la energía total de un fluido (aire, agua, gas caliente o vapor) en energía mecánica de rotación utilizada de manera directa para mover un generador eléctrico acoplado. Las turbinas de vapor a condensación descargan el vapor a un intercambiador de calor (llamado condensador) donde mediante enfriamiento artificial, se condensa el vapor y se extrae como líquido haciendo un vacío que mejora la eficiencia del ciclo, mientras que las turbinas de vapor a contrapresión descargan el vapor directamente a la atmósfera a través de un silenciador.

Variable aleatoria: En probabilidad y estadística, es una variable cuyo valor no está definido y puede adquirir cualquier valor al azar en un intervalo de pertenencia.

Yacimiento: En geotermia, es una zona del subsuelo compuesta por rocas calientes con fluidos naturales calientes cuya energía térmica puede ser económicamente explotada para generar energía eléctrica o en diversas aplicaciones directas.

UNIDADES

EJ: Exajoule. Medida de energía equivalente a 10^{18} Joules.

GW: Gigawatt. Medida de potencia equivalente a mil millones de watts. O bien a mil Megawatts

kWh: Kilowatt-hora. Medida de energía que equivale a mil watts en una hora.

MW: Megawatt. Medida de potencia equivalente a un millón de watts.

1. RECOPIACIÓN DEL INVENTARIO DE LAS ZONAS GEOTÉRMICAS DE MÉXICO

Con base en el objetivo general y el primero de los objetivos particulares, en este capítulo se describe el potencial geotérmico general de México, incluyendo una relación de las principales zonas geotérmicas. Este capítulo empieza mencionando estimaciones previas del potencial geotérmico para generar energía eléctrica a partir de recursos de tipo hidrotermal, continúa con una estimación original realizada a partir de recursos de este mismo tipo, presenta después otra estimación original con el potencial geotermoeléctrico del país a partir de recursos de roca seca caliente, que podría desarrollarse con tecnologías de sistemas geotérmicos mejorados (EGS: *Enhanced Geothermal Systems*), y termina con una estimación muy preliminar original sobre el potencial geotermoeléctrico del país a partir de sus recursos hidrotermales submarinos en el Golfo de California.

1.1. ESTIMACIONES PREVIAS DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO A PARTIR DE RECURSOS HIDROTERMALES

Al menos desde la década de los setenta se han efectuado diversas estimaciones sobre el potencial geotérmico de México. Por ejemplo, en 1975 Héctor Alonso estimó una capacidad geotermoeléctrica total del orden de 4000 MW (megawatts eléctricos), considerando diversas zonas geotérmicas de alta temperatura ubicadas en la Faja Volcánica Mexicana (entre ellas Ixtlán de los Hervores, Los Negritos, Los Azufres, La Primavera, San Marcos, Hervores de la Vega, La Soledad y Los Humeros), además del potencial del campo geotérmico de Cerro Prieto y sus alrededores, en el cual ya operaban para esa fecha las dos primeras unidades geotermoeléctricas de 37.5 MW cada una (citado por Mercado *et al.*, 1982) (ver Tabla 1). Cabe advertir que de tales zonas, sólo la de San Marcos, Jal., resultó fallida, pues las demás o ya han sido desarrolladas (Los Azufres, Mich., Los Humeros, Pue.) o siguen siendo consideradas a la fecha con alto potencial geotermoeléctrico.

Por su parte, en 1976 Sergio Mercado calculó un potencial superior a los 13 mil MW (Tabla 1), mediante un proceso simplificado que incluía una estimación del volumen de roca porosa y permeable en cada zona geotérmica, la estimación del calor recuperable en superficie en ese volumen y la aplicación de un factor de conversión entre la energía térmica y la energía eléctrica que podría generarse con ella (Mercado, 1976).

Hacia 1985 Alonso publica una nueva estimación que llega a casi 12 mil MW para el potencial geotérmico total del país, compuesto por 1340 MW de reservas probadas, 4600 MW de reservas probables y 6000 MW para las reservas posibles (Alonso, 1985). Al mismo tiempo, Mercado *et al.* (1985) presentaban una evaluación del potencial geotérmico del país para recursos de temperatura intermedia (125 a 135°C), que llegaba a casi 46 mil MW (Tabla 1).

El Instituto de Investigaciones Eléctricas, por su parte, ha realizado diversos cálculos para evaluar el potencial térmico de México. Uno de los más recientes fue publicado por Iglesias y Torres en 2009. Este incluye una estimación aplicando un método volumétrico sobre un total de 276 localidades termales distribuidas en 20 estados de la república para las cuales se

contaba con datos confiables. Estas localidades representan el 21% de las 1310 identificadas en el país. También utilizaron el método Montecarlo para reducir la incertidumbre, obteniendo una variedad de estadísticas (media, moda, mediana, desviación estándar, variancia, percentiles, etc.) que permitieron determinar intervalos de confianza para la energía térmica estimada. Para el análisis volumétrico se asignó a cada localidad un área mínima de 1 km², máxima de 3 km² y más probable de 2 km², y se asumió un espesor uniforme mínimo de 1 km, máximo de 2.5 km y más probable de 1.5 km. El calor específico volumétrico se calculó suponiendo que el correspondiente a la roca es de 2500 kJ/m³°C y que la porosidad del yacimiento era de 15% en todos los casos. Las temperaturas probables del yacimiento se asignaron en función de los datos de geotermometría disponibles. Obtuvieron una distribución de temperaturas de fondo más probables para las 276 localidades, cuya media resultó ser de 111°C, la moda de 110°C, y la desviación estándar de 20.5°C. Como resultado de la estimación se obtuvo un volumen total de calor almacenado hasta una profundidad máxima de 3 km, de entre 308 y 345 EJ (exajoules) térmicos, con un intervalo de confianza de 90%. Aplicando un factor de recuperación del 25%, se llegó a una estimación del potencial térmico total entre 77 y 86 EJ térmicos, que equivalen a 21.4-23.9 x 10⁹ MW térmicos (Iglesias y Torres, 2009). Desde luego, en este caso se trata de la energía térmica total almacenada en el subsuelo, y no de un potencial geotérmico en términos de capacidad instalada aprovechable en usos directos.

Recientemente la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) publicó una estimación volumétrica del potencial geotérmico total de México, con base en un catálogo de 1300 manifestaciones termales. Estas fueron clasificadas, de acuerdo a la estimación de sus temperaturas de fondo con base en geotermómetros, en tres rangos de temperatura: alta (> 200°C), media (150–200°C) y baja (90–150°C). En cada zona de manifestaciones se asumió una superficie de 1 kilómetro cuadrado, un espesor de 2 kilómetros, una porosidad de 15%, un factor de recuperación de calor del 25%, factores de eficiencia de conversión de energía térmica a eléctrica de 0.18 (más de 200°C), 0.125 (150-200°C) y 0.11 (90-150°C), un factor de planta de 0.95 y un tiempo de vida útil de 30 años (Ordaz-Méndez *et al.*, 2011).

Con esos datos, se calculó un potencial geotérmico probable (reservas tipo 2P) de 2077 MW y uno posible (reservas tipo 3P) de 7423 MW, en ambos tipos para recursos de baja a alta entalpía (90 a más de 200°C). Por su parte, las reservas probadas (tipo 1P) se consideraron como los proyectos de ampliación de capacidad instalada en los cuatro campos en operación actual (Cerro Prieto, BC, Los Azufres, Mich., Los Humeros, Pue., y Las Tres Vírgenes, BCS) más el potencial evaluado en el campo de Cerritos Colorados, Jal., obteniendo así un potencial de 186 MW, adicionales a los 958 MW de capacidad instalada actual (Ordaz-Méndez *et al.*, 2011). En total, tomando en cuenta los tres tipos de reservas definidos, la GPG concluye que el potencial geotermoeléctrico total de México es de 9686 MW, es decir unas diez veces la capacidad instalada actual. Si sólo se consideraran las reservas probadas, probables y posibles de temperaturas medias a altas (>150°C), el potencial total sería de 8623 MW.

En resumen, las principales estimaciones del potencial geotérmico de México para generar energía a partir de recursos geotérmicos hidrotermales continentales, se presentan en la Tabla 1.

Autor	Año	Capacidad instalada en esa fecha (MW)	Principales premisas y bases de la estimación	Total (MW)
Alonso, H.	1975	75	Se asumió un potencial de 500 MW en Cerro Prieto, 100 MW en diversas zonas estudiadas y 75 MW en zonas no estudiadas hasta esa fecha.	4,000
Mercado, S.	1976	75	Método volumétrico con base en características geoquímicas y geotermómetros conocidos en esa fecha.	13,110
Alonso, H.	1985	170	Estimación geológica. Se estimaron reservas probadas por 1340 MW, probables de 4600 MW y posibles de 6000 MW.	11,940
Mercado y otros	1985	170	Método volumétrico estimando recursos de temperaturas intermedias (125-135°C) en dos zonas del país: centro (3600 km ² y 2 km de espesor) y sur (2000 km ² y 1.5 km de espesor).	45,815
Iglesias y Torres	2009	958	Estimación de calor almacenado a 3 km mediante un método volumétrico y Montecarlo para el 21% de recursos de temperatura baja a intermedia en 20 estados del país.	77-86 (EJ térmicos)
Ordaz y otros	2011	958	Método volumétrico sobre 1300 localidades termales de baja a alta temperatura. Reservas probadas: 186 MW, probables: 2077 MW, posibles: 7423 MW.	9686

Tabla 1. Principales estimaciones del potencial geotérmico de México para generar electricidad a partir de recursos de tipo hidrotermal.

1.2. MÉTODO DE TRABAJO PARA ESTE NUEVO ESTUDIO

Para esta nueva estimación del potencial geotérmico de México tomando como punto de partida sus recursos de tipo hidrotermal identificados a la fecha, se decidió seguir un enfoque diferente a los mencionados en la sección precedente, y concentrarse más bien en las zonas geotérmicas de mayor interés previamente identificadas. Para ello, el método de trabajo consistió, como primer paso, en la recopilación de la información disponible sobre las zonas geotérmicas de mayor relevancia y se prepararon las fichas monográficas que se presentan más adelante. Cada ficha incluye la localización de la zona, sus principales características geológicas y geotérmicas y los estudios ya realizados. Puede decirse que las 20 zonas seleccionadas no son una lista exhaustiva de zonas identificadas sino que 20 zonas, que a juicio del autor, son las más interesantes para estudiar en detalle.

El segundo paso fue aplicar en cada una de esas zonas un modelo de tipo volumétrico acoplado a una simulación Montecarlo, a partir de los parámetros específicos estimados para cada una de ellas (que también se incluyen en las fichas). Después se aplicó otro modelo, en este caso un modelo simplificado de descompresión gradual, a partir de esos mismos parámetros específicos. Finalmente, mediante la aplicación de ambos modelos se estimó el potencial geotermoeléctrico individual de cada zona.

A continuación se describen los modelos aplicados a cada zona.

1.2.1. Modelo volumétrico con simulación Montecarlo

El modelo volumétrico, mejor conocido como método *USGS Heat in Place*, propone una forma simple para estimar el potencial de un yacimiento geotérmico y es muy útil en etapas tempranas del desarrollo de un proyecto geotermoeléctrico.

El método evalúa la cantidad de calor recuperable, determinando el calor disponible en el yacimiento y suponiendo que el recurso geotérmico (totalmente en fase líquida) se lleva hasta la superficie con una efectividad de recuperación R_g y luego es enfriado hasta la temperatura ambiente (recuperación ideal), de acuerdo con las ecuaciones siguientes:

$$q_{recuperable} = R_g q$$

$$q_{recuperable} = R_g V \cdot [\phi \rho_{agua} C_{p_{agua}} + (1 - \phi) \rho_{roca} C_{roca}] \cdot (T_{yacimiento} - T_{ambiente})$$

Donde q es el calor disponible, V el volumen total del yacimiento, ϕ la porosidad, ρ la densidad, C_p el calor específico a presión constante, C la capacidad calorífica y T la temperatura.

Se determina la cantidad de fluido que debería ser extraída del yacimiento para recuperar este calor, dividiendo el calor recuperable por la diferencia entre la entalpía del agua en el yacimiento y la que tendría si se enfriara hasta temperatura ambiente:

$$M_{Recuperable} = \frac{q_{Recuperable}}{h_{yacimiento} - h_{ambiente}}$$

Posteriormente se evalúa la fracción de vapor que se generaría en superficie al llevar el fluido a la presión de separación, lo que permite convertir la masa recuperable (en condiciones ideales) en masa aprovechable (en condiciones reales):

$$M_{Aprovechable} = X_{separador} \cdot M_{Recuperable}$$

La calidad en el separador ($X_{separador}$) es la fracción de fluido recuperado que realmente puede ser utilizado en la generación, y está en función de la presión de separación (si se supone flujo isoentálpico):

$$X_{separador} = \frac{h_{yacimiento} - h_{f@sep}}{h_{fg@sep}}$$

Cuando ya se conoce la cantidad de masa aprovechable se puede determinar de forma sencilla el potencial geotérmico en potencia eléctrica dividiendo este valor por el tiempo de explotación y el consumo específico calculado de la central:

$$\dot{W}_{electrica} = \frac{M_{Aprovechable}}{CE_{central} \cdot t}$$

El consumo específico de la central está estrechamente relacionado con el inverso de la eficiencia del ciclo, es decir, una central eficiente tendrá menor consumo específico que una central ineficiente:

$$CE_{central} = \frac{1}{\eta_{ciclo}(h_{g@sep} - h_{ambiente})}$$

Por lo tanto para evaluar de manera simple el potencial de un yacimiento, se requiere conocer por lo menos los siguientes parámetros:

- Temperatura, superficie y espesor del yacimiento
- Factor de recuperación (Rg)
- Porosidad de la roca
- Densidad de la roca
- Capacidad calorífica de la roca
- Presión de separación
- Vida útil del proyecto
- Temperatura ambiente
- Temperatura de bulbo húmedo/humedad relativa

Algunos de estos parámetros pueden conocerse con precisión aceptable y otros se pueden estimar con cierta incertidumbre, debido a que los procesos del subsuelo siempre implican incertidumbre. Por lo tanto, es necesario acoplar el método *USGS Heat in Place* con

simulaciones del método Montecarlo, el cual se aplica para evaluar el potencial con un fundamento estadístico y probabilístico.

De forma simple, el método de Montecarlo pretende encontrar la función de probabilidad del potencial geotérmico partiendo de variables aleatorias, esto es, evalúa la función a estudiar ('potencial geotérmico') con 'n' escenarios diferentes seleccionados de manera aleatoria, asignando al azar un valor a cada variable en su dominio de pertenencia. Por lo tanto, se tendrá un muestra aleatoria de los posibles resultados de la función potencial geotérmico lo que sugiere una distribución normalizada de resultados. Si se obtiene la media de la muestra se encontrará el valor más probable. Además se puede definir un intervalo de confianza con cierto rango de probabilidad. En otras palabras, uno puede obtener un intervalo de valores para una probabilidad de 90%, lo que indica que el valor real tiene una probabilidad del 90% de estar dentro de ese intervalo. Esto último es muy útil para la toma de decisiones, pues se puede estimar el potencial mínimo y máximo para cierto caso de estudio.

La función del potencial geotérmico de una zona es una función analítica que depende de las variables enlistadas anteriormente. Como se desconoce el valor preciso de cada variable, no es posible obtener un resultado único, pero se puede estimar un dominio de pertenencia y la distribución de probabilidad de ocurrencia para cada variable aleatoria. Por ejemplo, para el caso de la variable 'presión de separación', se puede estimar con cierta seguridad que en una planta geotérmica será de 9 bar, aunque la presión de separación real será establecida hasta que se conozcan con certeza las condiciones del fluido. Sin embargo, por experiencia se puede aseverar que la presión de separación estará entre un mínimo de 5 bar y un máximo de 12 bar. Por lo tanto, se puede definir una función que asocie bajas probabilidades de ocurrencia a la presión de 5 bar de separación, que gradualmente las incremente al acercarse al valor esperado de 9 bar, y que decrezca de nuevo al acercarse al límite superior de presión de separación de 12 bar. Así, la probabilidad de que se establezca una presión de separación por debajo de los 5 bar o por encima de los 12 bar será casi nula, por lo que se puede aproximar a una función triangular a pesar de que se esperaría una función de distribución normal. La función, por lo tanto, tendría la forma que se ve en la Figura 1.

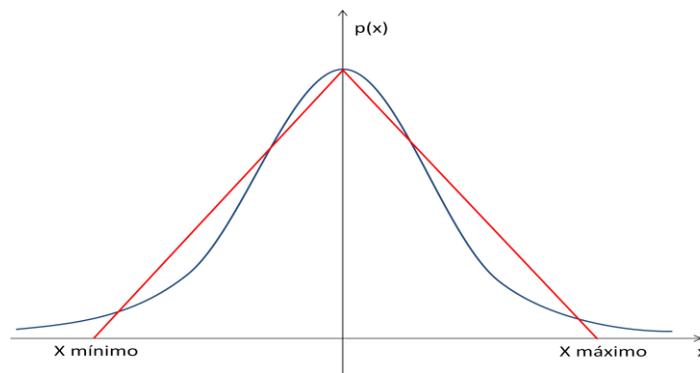


Figura 1. Función de probabilidad $p(x)$ para la variable aleatoria x , en el dominio de pertenencia x_{min} - x_{max} .

La función de probabilidad acumulada, que resulta de mayor utilidad al usar este método, tendría la forma que se presenta en la Figura 2.

$$P(x) = \int p(x)dx$$

Por lo tanto para cada valor de probabilidad acumulada (valor entre 0 y 1), se obtendrá un valor para la variable aleatoria ‘presión de separación’. De manera análoga se debe definir la función de probabilidad acumulada para cada una de las demás variables.

Lo que propone el método Montecarlo es escoger al azar un número para cada variable y evaluar la función ‘potencial geotérmico’, con lo que se tendrá una muestra. Así sucesivamente se repetirán ‘n’ ensayos aleatorios hasta tener un muestreo representativo de la población de la función estudiada. Esta población seguirá una distribución normal de Gauss y tendrá mayor precisión cuanto mayor sea la muestra ‘n’. Finalmente se estará en condiciones de analizar estadísticamente el muestreo y encontrar el valor más esperado de la función, la desviación de los resultados y un intervalo de confianza para cierta probabilidad.

Ambos métodos combinados, el *USGS Heat in Place* y el Montecarlo, se aplicaron para cada una de las zonas geotérmicas que se describen a continuación, proponiendo una función triangular de probabilidad a cada variable aleatoria y un rango de pertenencia entre un mínimo, un máximo y un valor más probable. Los parámetros mínimos, máximos y más probables fueron estimados a partir de la revisión de la literatura disponible y de la experiencia técnica del equipo de trabajo.

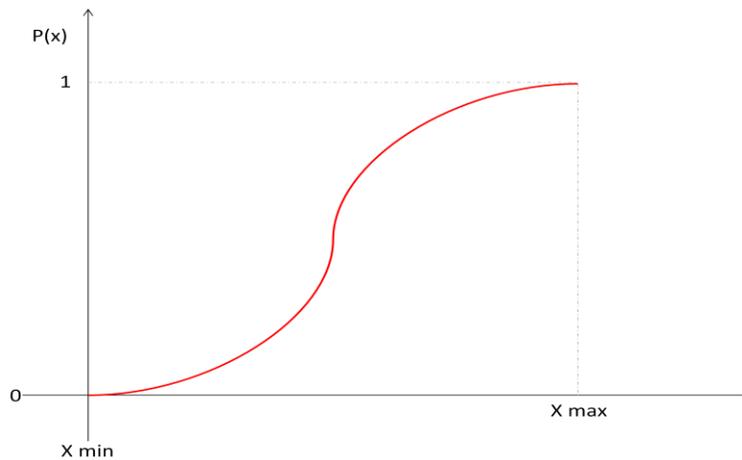


Figura 2. Función de probabilidad acumulada $P(x)$ para la variable aleatoria x , en el dominio de pertenencia $x_{min}-x_{max}$.

El análisis Montecarlo se realizó para cada zona con un tamaño de muestra de 10 mil combinaciones aleatorias. Como resultados, se presenta la potencia a instalar y la masa aprovechable con mayor probabilidad de ocurrencia en cada zona. También se presenta el potencial geotérmico mínimo y máximo con un intervalo de confianza del 90%.

1.2.2. Modelo de descompresión gradual con Montecarlo

Este modelo es una herramienta simple pero con los fundamentos teóricos necesarios para precisar sus resultados. Este modelo resulta más simple que un modelo numérico completo (elemento finito), pero con una precisión considerable, ya que presenta una complejidad mayor que el análisis volumétrico. Este modelo se basa siguiendo la metodología desarrollada por Hiriart y Sánchez (1985), donde se resuelven las ecuaciones de conservación de masa y energía en función de las propiedades termodinámicas del fluido (agua-vapor), se plantean las ecuaciones diferenciales que simulan el comportamiento de un yacimiento geotérmico, considerándolo como un recipiente con permeabilidad infinita. Esto evidentemente afectaría al número de pozos requeridos para desarrollarlo, mas no a la capacidad térmica y evolución termodinámica promedio al descomprimirlo.

El modelo se desarrolló partiendo de los principios fundamentales de conservación de masa y energía. Se inicia considerando un volumen de yacimiento constante, en el que el fluido se encuentra en estado bifásico de saturación. Después modela la extracción de fluido y va recalculando las condiciones termodinámicas del yacimiento debido a la descompresión asociada a la extracción de masa, cuyo comportamiento dependerá de la variación en la calidad de vapor en el yacimiento. Como resultado se obtiene la evolución de la presión de fondo, la temperatura y la entalpía como función de la potencia instalada y las condiciones definidas para el yacimiento: porosidad, recarga de masa, recarga de calor, etc. Finalmente se define el potencial geotérmico cuando se ajusta la potencia instalada para el yacimiento de tal forma que éste alcance las condiciones de abandono definidas a priori, en el tiempo establecido para la vida útil del proyecto.

Se considera un volumen de yacimiento del cual se realizará la extracción del fluido. Al modelar el caso más general se supone que la roca cede un porcentaje de calor, pero que existirá recarga de masa, y se evalúa el comportamiento en el tiempo.

Las ecuaciones parten de:

$$q - \dot{m} = \frac{dM}{dt} \quad M = \frac{\forall \phi}{v} \quad \dot{m} = \frac{dM}{dt}$$
$$\Rightarrow q - \dot{m} = -\frac{M}{v} \frac{dv}{dt}$$

Donde q es la recarga, \dot{m} el flujo másico de extracción al yacimiento, M la masa de agua en el yacimiento, \forall el volumen del yacimiento, ϕ la porosidad de la roca, v el volumen específico del agua a las condiciones del yacimiento y t el tiempo.

Sustituyendo y simplificando se llega a la siguiente expresión de forma simple. Nótese que el término α está asociado con la recarga de fluido al yacimiento, y el término β está asociado a la transferencia de calor de la roca al fluido:

$$\Rightarrow \alpha dv = du + \beta dp$$

$$\alpha = \frac{1}{v} \left[\left(\frac{qhR - \dot{m}he}{(q - \dot{m})} \right) - u \right]$$

$$\beta = \frac{(1 - \phi)v\rho_R}{\phi} C_R \left. \frac{\partial T}{\partial P} \right|_{sat}$$

Donde hR es la entalpia de la recarga, he es la entalpia de extracción, u es la energía interna específica, ρ_R y C_R son la densidad y calor específico de la roca, T la temperatura y P la presión; el resto de las variables ya han sido definidas. En términos de presión:

$$dx = - \left(\frac{\alpha \left(\frac{dvf}{dP} + \frac{xdvfg}{dP} \right) \left(\frac{duf}{dP} + \frac{xdufg}{dP} \right) + k\beta}{(\alpha vfg + ufg)} \right) dP$$

Donde dx es la variación de la calidad de vapor, vf , vfg , uf y ufg son el volumen específico de líquido y de líquido-vapor, y la energía interna de líquido y de líquido-vapor respectivamente, dP son los incrementos de presión y las demás variables ya han sido definidas.

Es importante recalcar que se ha incluido un factor de transferencia de calor de la roca al fluido k que asocia la fracción de calor que cede la roca al fluido.

Esta expresión determinará el comportamiento de la calidad como función de los cambios de presión y la extracción de masa (consumo en la planta) que se efectúa en el yacimiento. A continuación se deberá dar solución a la ecuación para encontrar la cantidad remanente de agua contenida en el yacimiento y a qué nuevas condiciones se encuentra, para ser vinculadas apropiadamente con el tiempo:

$$dt = \frac{M_{@P0} - M_{@P1}}{\dot{m}} = \frac{M_{@P0} - M_{@P1}}{X_{sep} \dot{W}_e CE}$$

Se deberá iterar hasta encontrar la potencia que corresponda al tiempo de vida útil definido para el yacimiento.

En cada zona se evaluaron los campos seleccionados, alimentando el modelo con el valor medio para cada variable, es decir, el escenario más esperado, y se incluyeron las gráficas de evolución del yacimiento en el tiempo (presión, entalpia y calidad de vapor). Los datos adicionales utilizados fueron:

- Recarga: Se asumió un 50% de la extracción promedio. Las condiciones de recarga fueron las condiciones de líquido en el separador.
- Fracción de transferencia de calor: $k = 10\%$,
- Calidad inicial de vapor en el yacimiento: 0% (líquido saturado).
- Presión de abandono: 9 bar.

1.3. ZONAS CON RECURSOS GEOTÉRMICOS HIDROTERMALES

En esta sección se presentan las fichas de las zonas siguientes y el resultado de su potencial al aplicar los métodos de evaluación

Zona geotérmica	Estado	Potencial estimado en MW		
		Modelo volumétrico*		Modelo de descompresión
		Valor probable	Rango (90%)	
1. La Soledad	Jalisco	52	10 – 94	51
2. Las Planillas	Jalisco	70	26 – 113	83
3. Pathé	Hidalgo	33	6 – 61	49
4. Araró	Michoacán	21	5 – 37	32
5. Acoculco	Puebla	107	38 – 177	48
6. Ixtlán de los Hervores	Michoacán	17	0 – 23	15
7. Los Negritos	Michoacán	24	3 – 44	20
8. Volcán Ceboruco	Nayarit	74	34 – 113	50
9. Graben de Compostela	Nayarit	105	35 – 175	110
10. San Antonio El Bravo (Ojinaga)	Chihuahua	27	10 – 43	36
11. Maguarichic	Chihuahua	1	0.2 – 1.7	1
12. Puruándiro	Michoacán	10	3 – 17	12
13. Volcán Tacaná	Chiapas	60	21 – 99	52
14. El Orito-Los Borbollones	Jalisco	11	1 – 21	9
15. Santa Cruz de Atistique	Jalisco	12	2 – 22	13
16. Volcán Chichonal	Chiapas	46	9 – 84	45
17. Hervores de la Vega	Jalisco	45	20 – 71	45
18. Los Hervores-El Molote	Nayarit	36	12 – 59	17
19. San Bartolomé de los Baños	Guanajuato	7	3 – 12	9
20. Santiago Papasquiaro	Durango	4	1 – 7	4
Total		762		701

* Se reporta el valor de potencial más probable, y el potencial mínimo y máximo para un intervalo de confianza del 90%, como se indica en cada una de las fichas siguientes.

Como se observa, el valor más probable del potencial geotermoeléctrico conjunto estimado en estas 20 zonas geotérmicas con el modelo volumétrico-Montecarlo suma 762 MW, mientras que con el modelo de descompresión gradual es de 701 MW, lo que equivale a un 73-80% de la capacidad geotermoeléctrica que actualmente opera la CFE en México, que es de 958 MW.

Es importante tener en cuenta que ambas estimaciones se basan en los datos preliminares que se indican en las fichas siguientes para cada zona geotérmica examinada, datos que en muchos casos son estimativos, por lo que el resultado en cada caso debe tomarse como una indicación de la magnitud de su probable potencial geotermoeléctrico pero no como definitivo ni preciso. Para llegar a un resultado más preciso, es necesario evaluar cada zona de manera individual y, en su caso, completar los estudios faltantes.

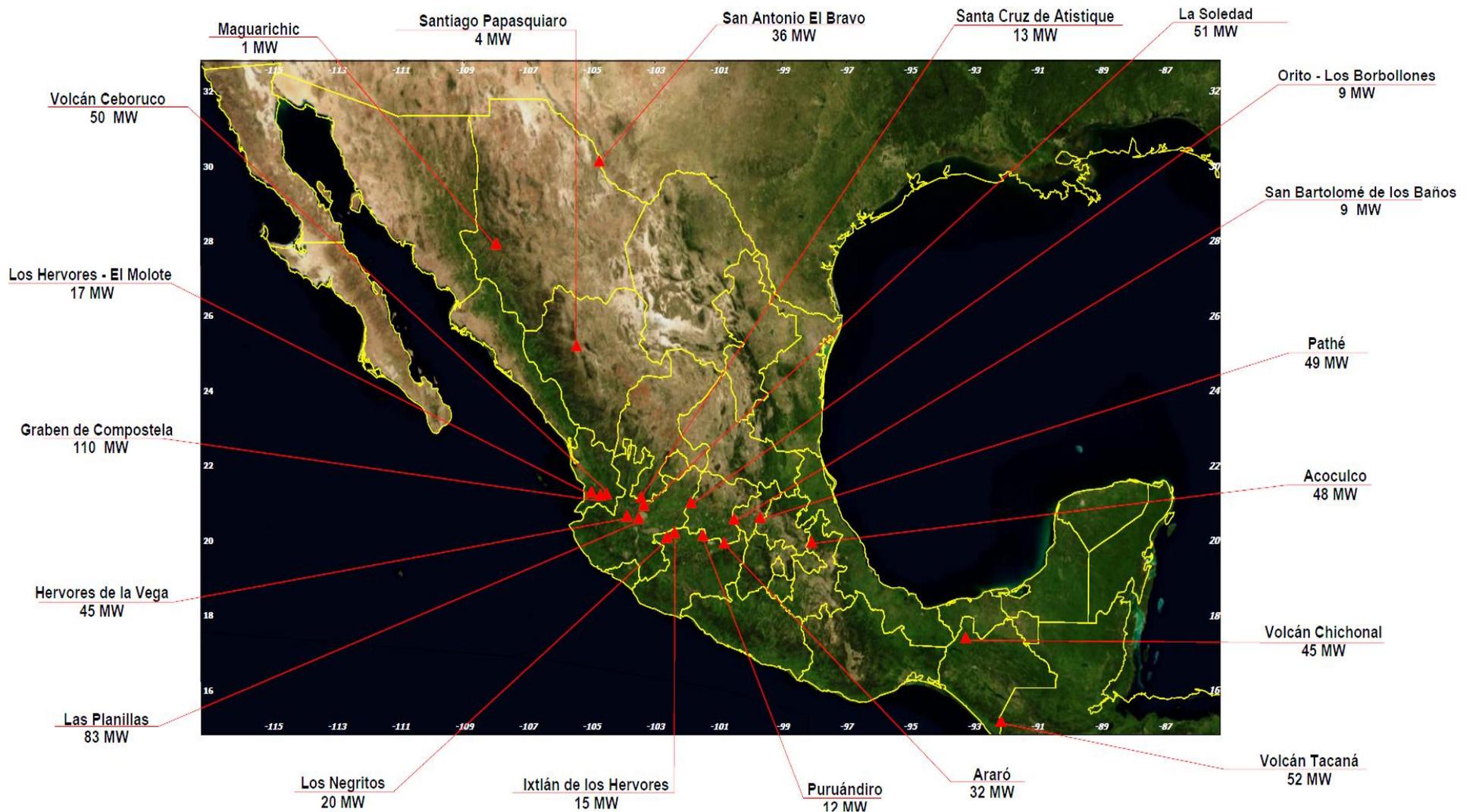
Por otro lado, cabe advertir que las zonas evaluadas no incluyen a ninguno de los cuatro campos geotérmicos en explotación actual (Cerro Prieto, BC, Los Azufres, Mich., Los Humeros, Pue., y Las Tres Vírgenes, BCS), ni al campo geotérmico de Cerritos Colorados, Jal. Como se mencionó en la sección 1.1, en estos campos la CFE considera un potencial adicional de 186 MW (Ordaz-Méndez et al., 2011), que incluye la instalación de dos unidades adicionales 25 MW cada una en el campo de Los Humeros, actualmente en construcción, así como 75 MW en el campo de Cerritos Colorados, entre otras expansiones de la capacidad instalada actual.

Si se agregan esos 186 MW a las estimaciones obtenidas con la aplicación del modelo volumétrico-Montecarlo y con el modelo de descompresión gradual, puede concluirse que el potencial geotermoeléctrico adicional del país para recursos de tipo hidrotermal, susceptible de ser explotado mediante plantas a condensación y plantas de ciclo binario, se encuentra entre 887 y 948 MW.

Considerando la capacidad actual instalada, la principal conclusión de este estudio es que se puede duplicar la potencia actual instalada, sin descartar el desarrollo de otros campos geotérmicos no descritos en esta selección de las 20 zonas más promisorias. En las proyecciones a largo plazo habrá que incluir también las nuevas tecnologías de tipo EGS y de ventilas hidrotermales submarinas mencionadas también en este estudio.

Descripción de las 20 zonas geotérmicas seleccionadas

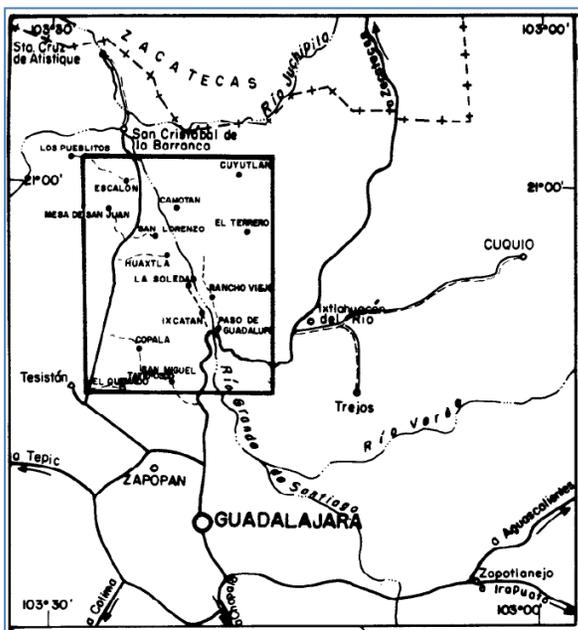
A continuación se presentan las fichas descriptivas de cada una de las 20 zonas geotérmicas evaluadas, cuya ubicación puede verse en la figura siguiente. Las fichas incluyen también los datos en los que se basó la aplicación de ambos modelos en cada una.



Localización de las 20 zonas geotérmicas seleccionadas

ZONA GEOTÉRMICA DE LA SOLEDAD, JAL.

Localización



La zona se ubica a unos 15 km al norte de Guadalajara, Jal., teniéndose acceso a ella a través de la carretera federal No. 54 o de la carretera estatal Guadalajara-San Cristóbal de la Barranca. Sus coordenadas son: $20^{\circ}54'03''$ de latitud norte y $103^{\circ}21'30''$ de longitud oeste. Fisiográficamente está en el límite de las provincias de la Sierra Madre Occidental y de la Faja Volcánica Mexicana, siendo el Río Grande de Santiago el límite entre ambas.

Características

Es una zona asociada a domos volcánicos cuaternarios de composición riolítica, en la que afloran andesitas, basaltos, ignimbritas y rocas piroclásticas con edades del Oligoceno-Mioceno al Cuaternario. El domo riolítico más reciente tiene 1.4 millones de años de

edad. Se encuentra afectada por sistemas estructurales de dirección noroeste-sureste, noreste-suroeste y este-oeste, estando los dos últimos probablemente activos y afectando a las rocas volcánicas más recientes. La falla La Soledad y otras de dirección NE-SW son los principales conductos de las manifestaciones termales.

En la zona se han identificado unos 30 manantiales termales algunas con desprendimiento de vapor y gases, asociadas con la falla La Soledad y otras de dirección NE-SW como la falla del Río Grande de Santiago, con temperaturas superficiales de 30 a 96°C . El agua de los manantiales termales es de composición sulfatada-sódica y bicarbonatada mixta (sódico a cálcico-magnesiano) con hasta 7 ppm (partes por millón) de boro y 2 ppm de litio, cuya temperatura de fondo se ha estimado mediante el geotermómetro de potasio-sodio entre 181 y 207°C . Los gases analizados son típicos de ambientes geotérmicos. A lo largo de la falla La Soledad hay abundantes depósitos de minerales hidrotermales como calcita, sílice y travertino.

La fuente de calor podría ser la cámara volcánica que originó los últimos domos y derrames riolíticos. La roca huésped de los fluidos sería una secuencia andesítica que representa el basamento local, y hay evidencias de un acuífero profundo que podría recargar al probable yacimiento geotérmico.

Estudios realizados

La CFE ha desarrollado estudios de geología, geoquímicos y geofísicos de cierto detalle en la zona, como producto de los cuales se determinó una zona de interés de 18 km^2 con tres áreas de mayor interés geotérmico en las que coinciden las anomalías geofísicas interpretadas, en

una superficie de 5.5 km². Existe un barreno a 600 metros de profundidad, perforado por particulares en 1972, que reveló la presencia de epidota, mineral hidrotermal típico de yacimientos geotérmicos, alterando a las rocas andesíticas atravesadas. La máxima temperatura medida fue de 121°C. Se reporta que el barreno arrojó agua caliente, hasta que fue obstruido por el depósito de sales, lo que implica una pobre permeabilidad entre los 0 y los 600 metros de profundidad.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **52 MW** con una desviación estándar de 26 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 10 y 94 MWe.

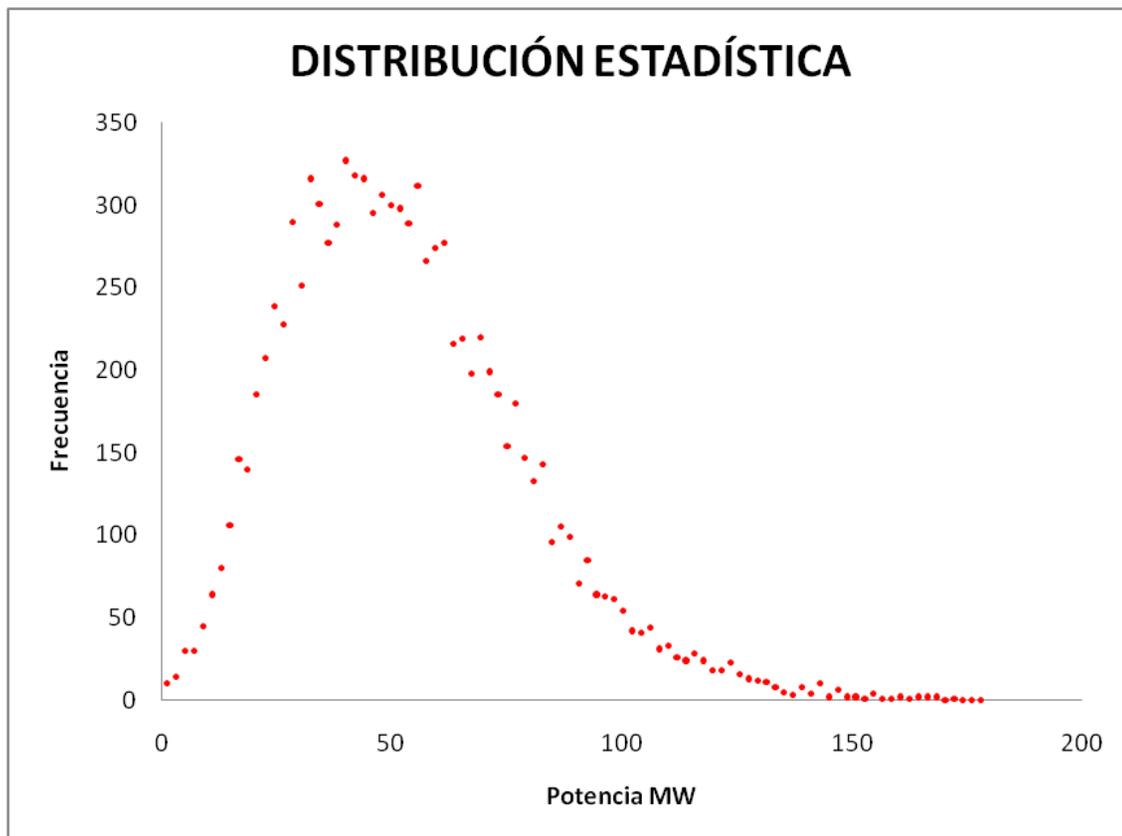


Figura 3. Resultados del modelo volumétrico para La Soledad

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

La Soledad, Jalisco			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	5.5	13	18
Espesor (km)	1	1.5	2.1
Temperatura del yacimiento (°C)	181	210	230
Temperatura ambiente (°C)	1	20	35
Humedad relativa (%)	29%	53%	78%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	3%	10%	22%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2220	2700	2950
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.8	0.85	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	10%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.1	2.2	2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **51 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 4 y 5.

El área máxima se determinó en función de la extensión de la anomalía resistiva menor de 15 ohm-metros, la mínima en considerando las probables raíces profundas de los mínimos resistivos en tres áreas dentro de la anomalía general. Los espesores se estimaron de acuerdo a las secciones electro-estratigráficas. En general se estima una permeabilidad secundaria alta. Los valores de la tabla previa son permeabilidades absolutas. Finalmente, de acuerdo con las características geohidrológicas generales de la zona, se considera que la probable recarga profunda es suficiente para compensar la descarga hasta el máximo de potencial evaluado.

Fuentes consultadas: Departamento de Exploración (1989b), Gutiérrez Negrín et al. (1989).

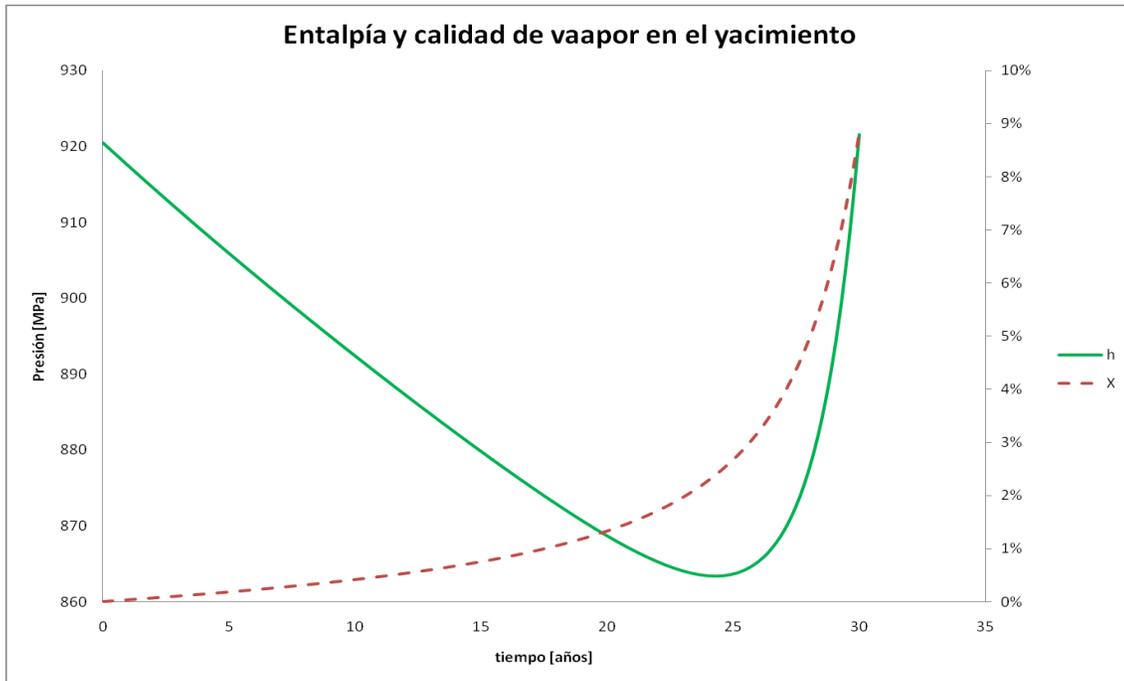


Figura 4. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de La Soledad.

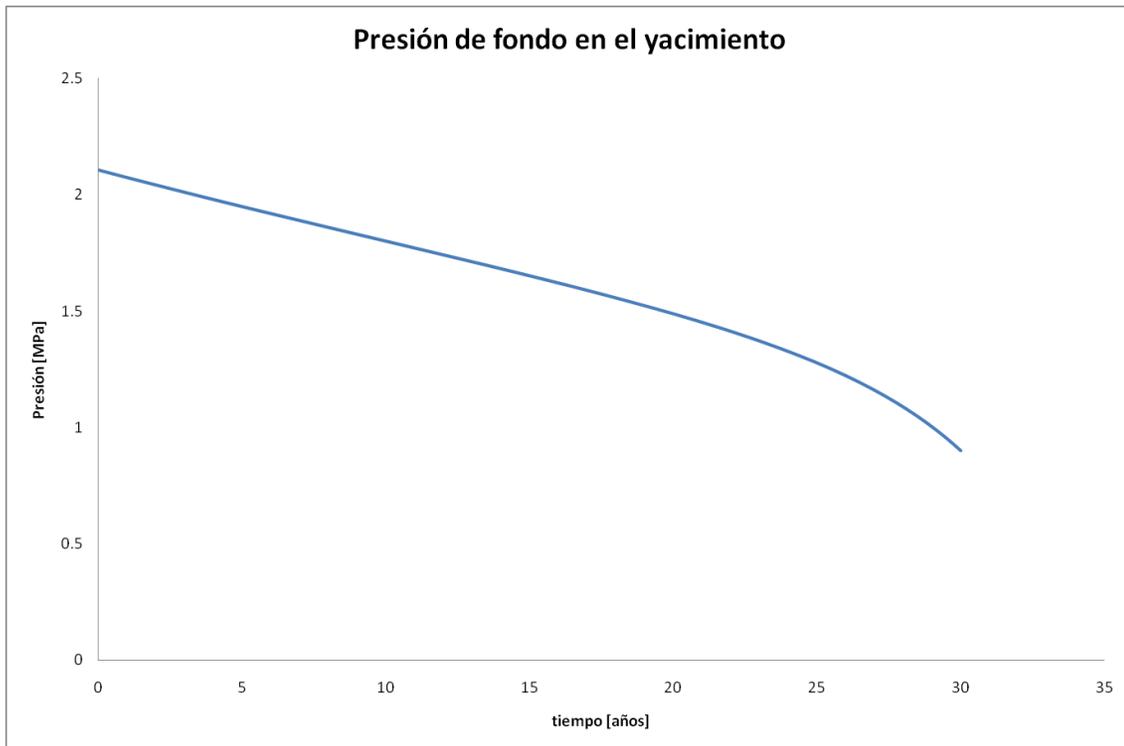


Figura 5. Evolución de la presión para el campo geotérmico de La Soledad.

ZONA GEOTÉRMICA DE LAS PLANILLAS, JAL.

Localización

Se localiza casi en la periferia occidental de la ciudad de Guadalajara, a unos 9 kilómetros al sur del campo geotérmico de Cerritos Colorados y dentro del Bosque de La Primavera. Sus coordenadas son: 20°33' de latitud norte y 103°31' de longitud oeste. Se ubica dentro de la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Mexicana, y el acceso puede hacerse a partir del periférico de Guadalajara.

Características

La zona geotérmica se encuentra en la cima de uno de los domos riolíticos conocidos como Las Planillas, con una edad muy reciente (unos 60 mil años) y extruido como parte de los eventos volcánicos finales de la formación de la cercana caldera volcánica de La Primavera. El domo presenta un cráter de explosión en cuyo interior hay fumarolas con temperaturas superficiales máximas de 90°C y en cuyo borde suroeste se encuentran manantiales con temperaturas de hasta 67°C y contenidos de boro de hasta 13 ppm, que pueden considerarse como una descarga lateral del probable yacimiento geotérmico del subsuelo.

Las temperaturas máximas de fondo han sido calculadas entre 242 y 250°C mediante la aplicación de geotermómetros de fase líquida y gaseosa.

La fuente de calor del probable yacimiento podría ser la misma cámara magmática que propició la formación de la caldera de La Primavera, que es de tipo riolítico, relativamente somera y cuya última actividad ocurrió hace unos 20 mil años. Los fluidos geotérmicos estarían contenidos en la misma secuencia de rocas volcánicas detectada en el subsuelo de la caldera, compuesta principalmente por rocas andesíticas con cantidades menores de tobas, riolitas y basaltos, cubiertas por la llamada Toba Tala compuesta por ignimbritas, que actúa como la capa sello del yacimiento.

Estudios realizados

La CFE ha realizado estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos de detalle en la zona, e incluso decidió la localización de un primer pozo exploratorio que sería perforado con recursos del Fondo Rotatorio de las Naciones Unidas para la Exploración de los Recursos Naturales. Como producto de ellos se ha identificado un área de interés geotérmico de unos 12 km² de superficie.

Cabe advertir que el Bosque de La Primavera está definido como un área de protección forestal y refugio de la fauna silvestre, y que actualmente el gobierno del estado de Jalisco ha adoptado un plan de manejo para este bosque, por lo que cualquier futuro desarrollo geotérmico en esta zona tendría que cumplir con requisitos muy estrictos en materia de protección ambiental, además de enfrentar una opinión pública históricamente poco favorable, lo que en 1989 derivó en el abandono de las actividades exploratorias que realizaba la CFE en el área.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **70 MW** con una desviación estándar de 26 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 26 y 113 MWe.

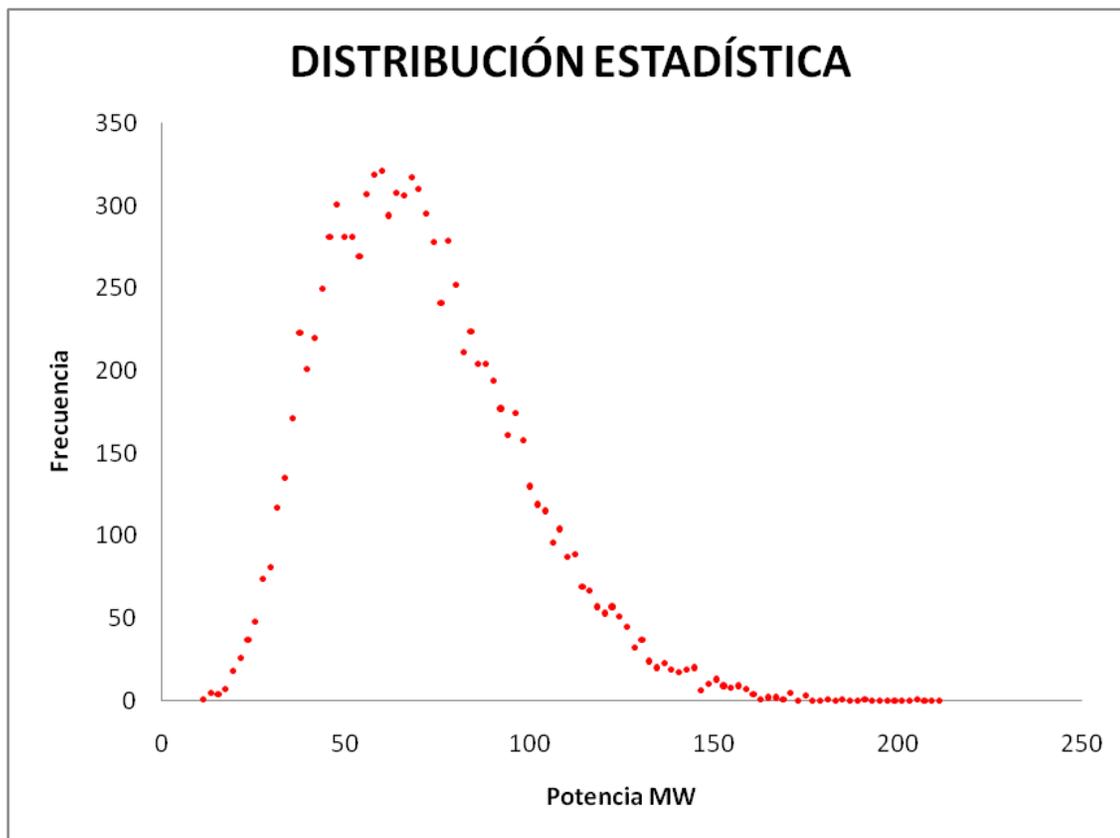


Figura 6. Resultados del modelo volumétrico para Las Planillas.

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Las Planillas, Jalisco			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	4	8	12
Espesor (km)	0.8	1.8	2.5
Temperatura del yacimiento (°C)	220	240	250
Temperatura ambiente (°C)	1	20	35
Humedad relativa (%)	29%	53%	78%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	8%	13%	15%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2220	2550	2850
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.8	0.83	1.1
Factor de recuperación R _g (%)	5%	10%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.1	2.1	2.2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **83 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 7 y 8.

El espesor fue estimado por correlación con los pozos del cercano campo geotérmico de Cerritos Colorados. En cuanto a la permeabilidad, se estima que puede haber una elevada permeabilidad secundaria, al menos tan alta como la de la secuencia andesítica en el campo de Cerritos Colorados. Las permeabilidades reportadas en la tabla son absolutas. Se considera que la recarga profunda no sería ningún problema, ya que podría compensar la descarga hasta el máximo de potencial evaluado, por correlación con las características de producción de los pozos geotérmicos cercanos.

Fuentes consultadas: Gutiérrez Negrín et al. (1989).

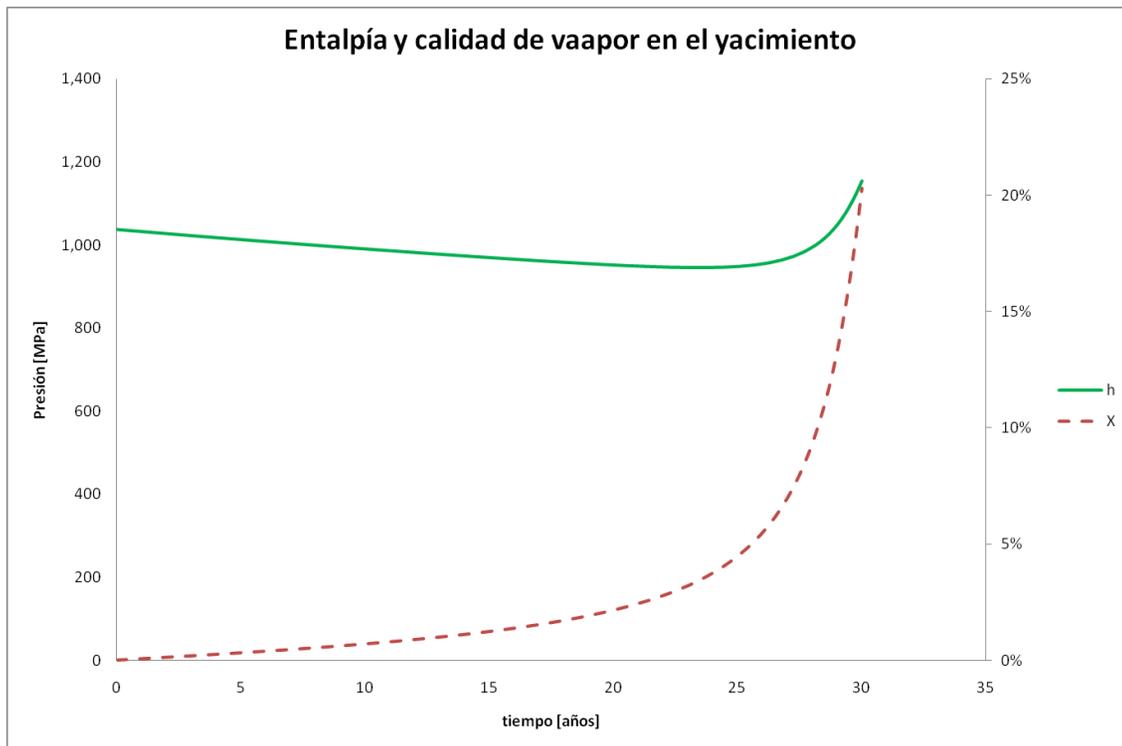


Figura 7. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vaapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Las Planillas.

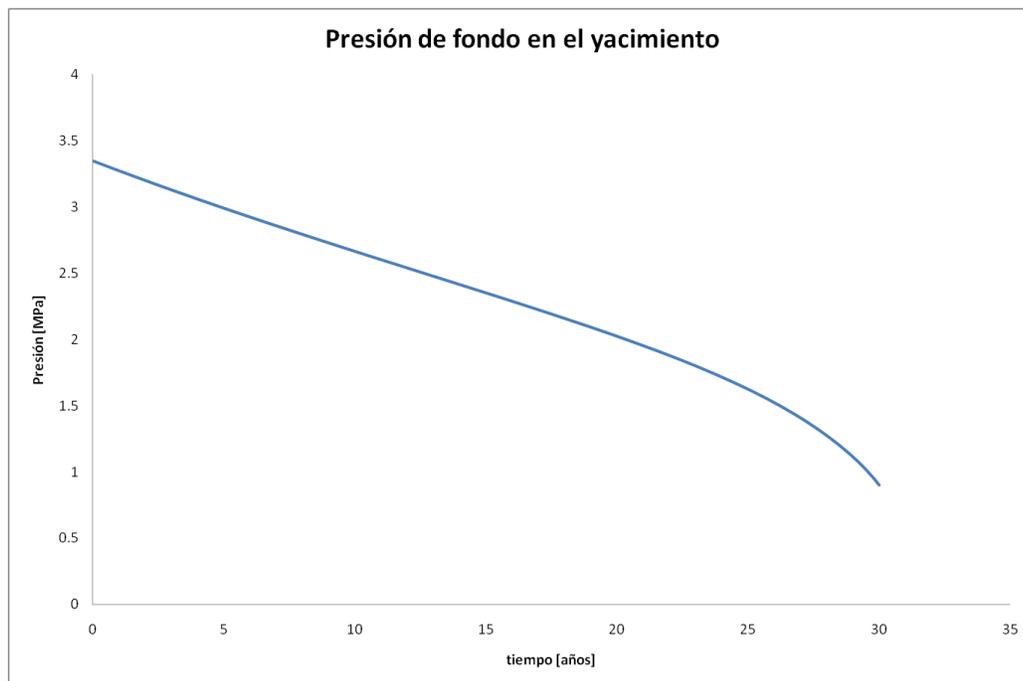
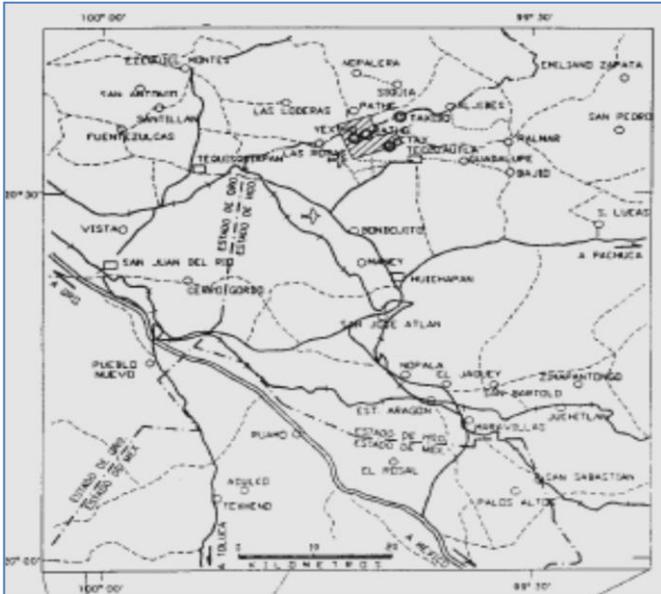


Figura 8. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Las Planillas.

ZONA GEOTÉRMICA DE PATHÉ, HGO.

Localización



Se ubica en el límite entre los estados de Hidalgo y Querétaro, a unos 35 kilómetros en línea recta al noroeste de San Juan del Río, Qro., y a 20 km al norte de Huichapan, Hgo. La zona queda comprendida entre las coordenadas geográficas: 20°33'30"-20°34'15" de latitud norte y 99°40'52"-99°42'50" de longitud oeste. Es posible llegar a la zona por la autopista México-Querétaro, y después por la carretera hacia Huichapan, Hgo. La zona se localiza en la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Mexicana, muy cerca de sus límites con la de la Sierra Madre Oriental.

Características

Aunque no hay evidencias de vulcanismo cuaternario, se trata de una amplia zona con manifestaciones termales superficiales, entre ellas manantiales, géiseres extintos, y zonas de alteración hidrotermal, relacionadas con el cruce de estructuras orientadas en direcciones norte-sur y este-oeste, principalmente con la intersección de la falla Pathé con la fractura por la que corre el Río San Juan. La zona se ubica en la porción oriental de un graben local (Gaben de Pathé) de orientación norte-sur y unos 10 kilómetros de anchura.

La alteración hidrotermal superficial, compuesta por minerales como caolín, clorita, sericita, sínter, zeolitas y epidota en menor proporción, cubre una superficie de 5 km². Los manantiales tienen temperaturas superficiales de 28 a 39°C con agua de composición bicarbonatada sódica, excepto la del pozo 1 que es de tipo clorurada sódica. Las temperaturas de fondo para el agua de este pozo han sido calculadas en 191°C con el geotermómetro de sodio-potasio. La geotermometría de gases (hidrógeno-argón) en el pozo 2 indica temperaturas de fondo de 221°C. En pozos y barrenos perforados por la CFE en la década de los cincuenta la temperatura común fue de 150°C a unos 300 metros de profundidad, aunque se reporta un pozo (el pozo 1) con temperatura mayor de 200°C a 230 metros de profundidad. De este pozo aún fluye agua a 95°C de temperatura.

El probable yacimiento podría estar contenido en andesitas, basaltos, riolitas y rocas piroclásticas de los grupos San Juan y/o Pachuca, que descansan sobre un basamento sedimentario (lutitas y calizas del Jurásico-Cretácico) a una profundidad estimada entre 2000 y 2300 metros.

Estudios realizados

La CFE ha realizado gran cantidad de estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos en esta zona, y de 1955 a 1960 perforó un total de 24 pozos y barrenos con profundidades entre 200 y 1300 metros, varios de los cuales produjeron agua y vapor aunque eventualmente algunos de ellos dejaron de fluir. Con todo, entre 1959 y 1972 operó ahí la primera planta geotermoeléctrica en el continente americano, con una capacidad nominal de 3.5 MW. En fechas más recientes la CFE determinó dentro de la zona dos áreas de mayor interés, conocidas como Pathé y Rancho Viejo.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **33 MW** con una desviación estándar de 17 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 6 y 61 MWe.

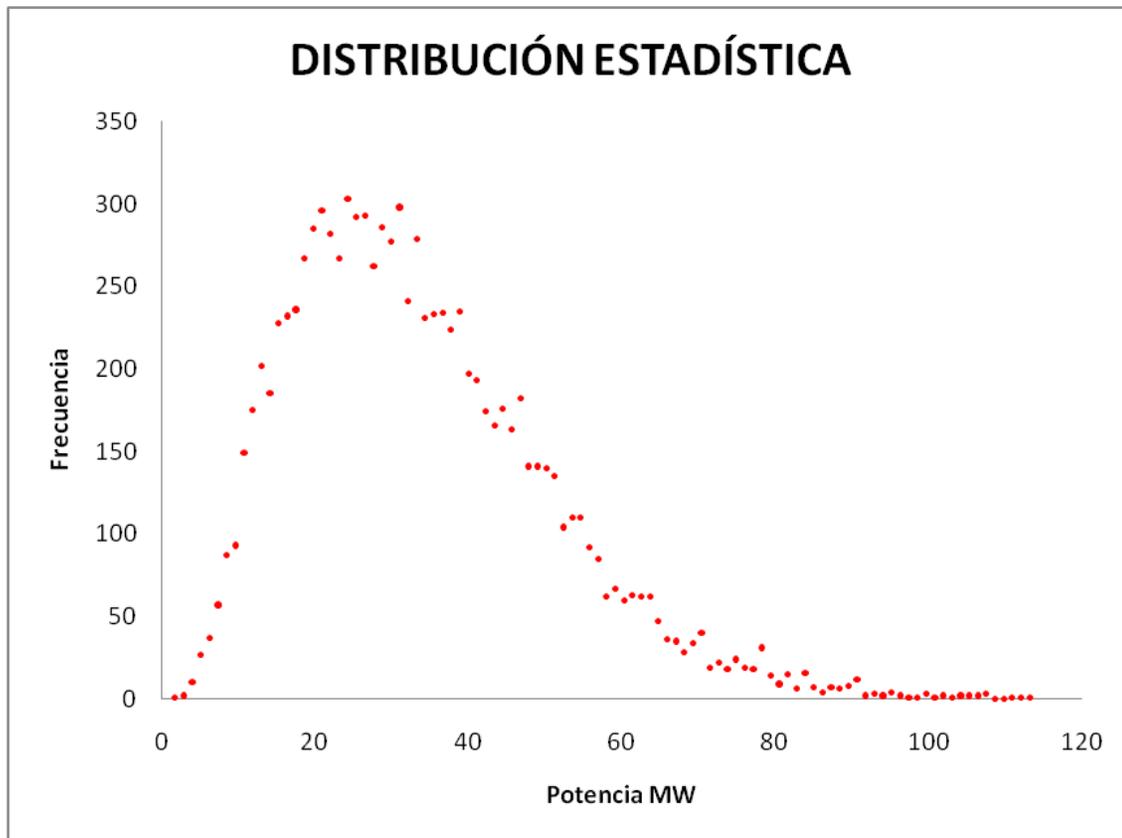


Figura 9. Resultados del modelo volumétrico para Pathé.

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Pathé, Hidalgo			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	1.5	6	8.5
Espesor (km)	0.8	2	3
Temperatura del yacimiento (°C)	190	215	230
Temperatura ambiente (°C)	-4	17.5	31
Humedad relativa (%)	35%	58%	82%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	4%	15%	20%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2200	2600	2900
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.8	0.84	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	10%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (mildarcy, mD)	0.1	2.2	2.2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **49 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 10 y 11.

El espesor probable se ha estimado con base en la profundidad a la que se espera el basamento sedimentario en la zona. Considerando las características de los pozos perforados en la década de los cincuenta y sesenta, se espera una alta permeabilidad secundaria, aunque en la tabla se reportan los datos de probables permeabilidades primarias absolutas. También se estima un volumen de recarga profunda suficiente para compensar la descarga hasta el máximo de potencial evaluado, en función de la geohidrología conocida en la zona.

(Fuentes consultadas: Bigurra (1984), Tello y Velázquez (1994), Casarrubias (1995), Gutiérrez-Negrín et al. (2000)).

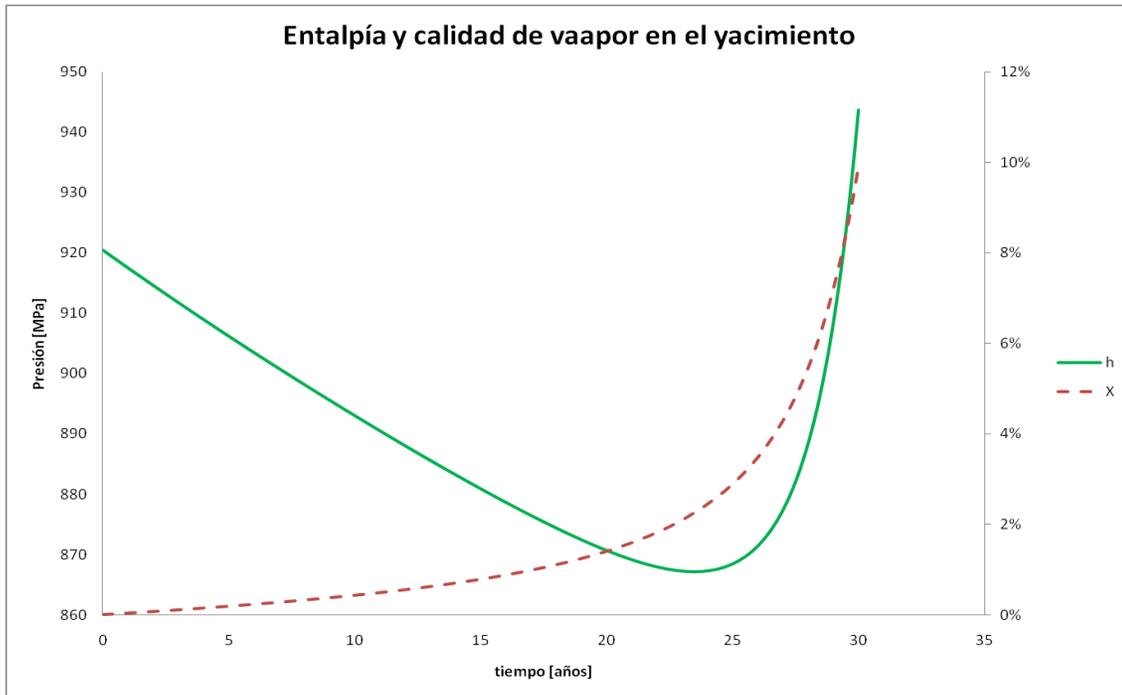


Figura 10. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Pathé.

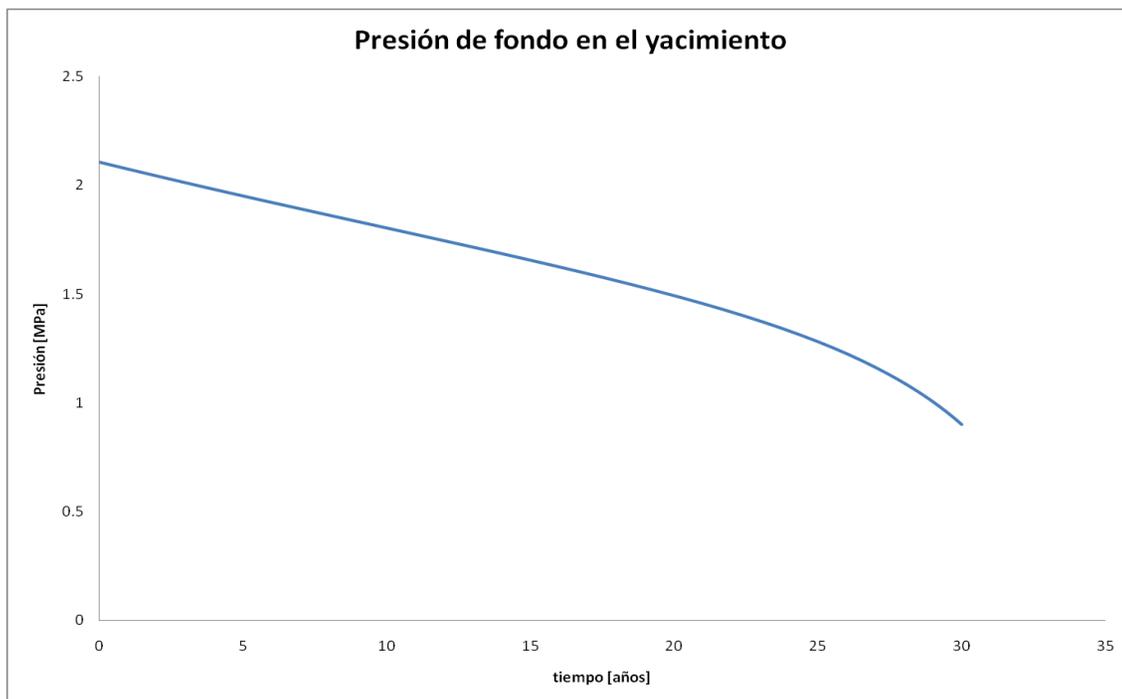
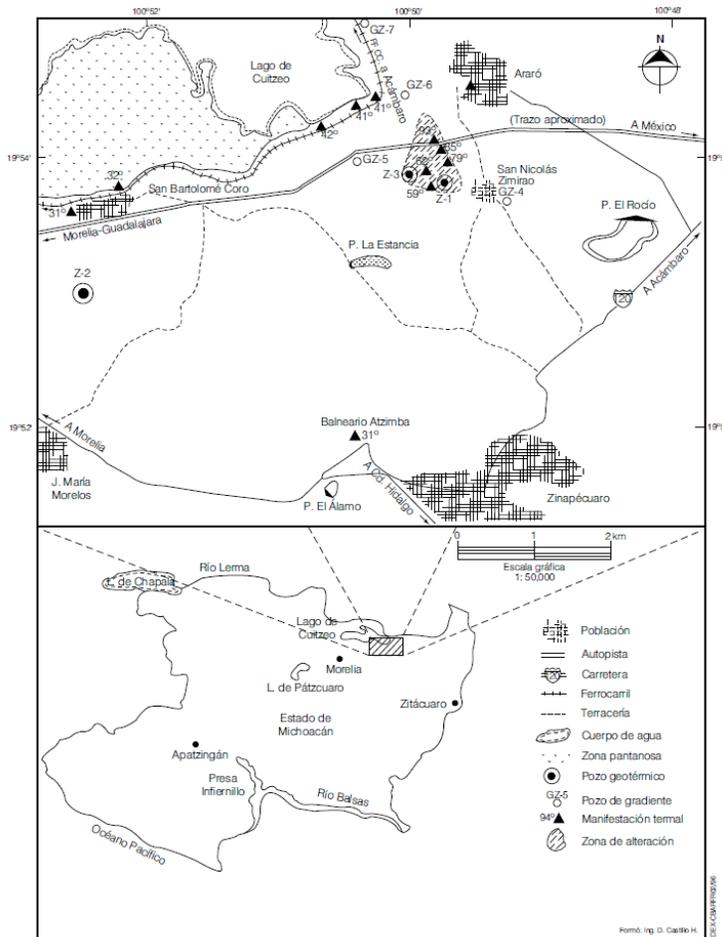


Figura 11. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Pathé.

ZONA GEOTÉRMICA DE ARARÓ, MICH.

Localización



Se ubica en la porción nororiental del Estado de Michoacán, a unos 40 kilómetros al noreste de Morelia, unos 30 kilómetros al noreste del campo geotérmico de Los Azufres, y al oriente del Lago de Cuitzeo. La zona de interés se localiza entre las coordenadas: 19°52'30" y 19°55' de latitud norte y 100°48' y 100°52'30" de longitud oeste, y a unos 1900 msnm de elevación. Puede accederse a ella por la autopista de cuota México-Guadalajara. Fisiográficamente, yace en la parte oriental del sector central de la provincia de la Faja Volcánica Mexicana.

Características

La zona se encuentra al interior de una depresión tectónica de dirección general este-oeste, conocida como Graben de Cuitzeo-Maravatío, que parece ser parte de una fosa tectónica más grande, que

se extiende desde Chapala, Jal., hasta Tepetongo, Méx. Las fallas más relevantes, conocidas como Falla Huingo y Falla Araró-Zimiraio, presentan esa misma dirección y actúan como conductos para el movimiento de los fluidos hidrotermales, con temperaturas superficiales entre 31 y 98°C. La actividad volcánica más reciente está representada por lavas y conos cineríticos de composición andesítica y basáltica, con edades entre los 0.6 y 0.7 millones de años, pero afloran también domos y lavas riolíticas y tobas riolíticas con intercalaciones de flujos piroclásticos con edades entre 0.9 y 1.6 millones de años. En la zona se encuentran manantiales termales con escape de gases y zonas de alteración, agrupados en varias áreas, de las cuales la más importante es la conocida como San Nicolás Zimiraio (48-99°C en una superficie de 10 hectáreas). Las aguas de los manantiales en esta área son de tipo clorurado sódico con concentraciones promedio de boro de 55 ppm. El geotermómetro de potasio-sodio indica temperaturas promedio de fondo de 205°C y máximas de 228°C.

Se considera que el yacimiento geotérmico estaría contenido en una secuencia de rocas andesíticas más antiguas que las que afloran en la periferia, de probable edad miocénica y

semejantes a las que hospedan a los fluidos en el campo de Los Azufres, que presentan un fuerte fracturamiento. De acuerdo con los resultados del pozo exploratorio Z-3, que se comentan a continuación, podría esperarse un yacimiento geotérmico entre 220 y 250°C a profundidades superiores a los 2000 metros. Se trataría de un yacimiento de líquido dominante, con salinidad total del orden de 4000 ppm y descarga rápida con escasa pérdida de calor, que parece haber presentado varios episodios de auto-sellamiento (por el depósito de minerales hidrotermales) e hidro-fracturamiento naturales.

Estudios realizados

La CFE ha realizado estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos de detalle, tanto en la zona de mayor interés como en otras zonas cercanas a la misma. Los estudios se han llevado a cabo en dos etapas, una en la década de los setenta y otra en la de los ochenta. Como conclusión de la primera etapa se perforó un pozo exploratorio en 1981, fuera de la zona de mayor interés, y como terminación de la segunda otro pozo, denominado Z-3 y perforado en 1991 a 1344 metros de profundidad. En este último pozo se registraron 101°C de temperatura al fondo, con un máximo de 135°C a 550 metros de profundidad. La mineralogía hidrotermal revela temperaturas que en el pasado debieron estar entre 250 y 300°C, mientras que los estudios de inclusiones fluidas indican paleo-temperaturas entre 218 y 247°C.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **21 MW** con una desviación estándar de 10 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 5 y 37 MWe.

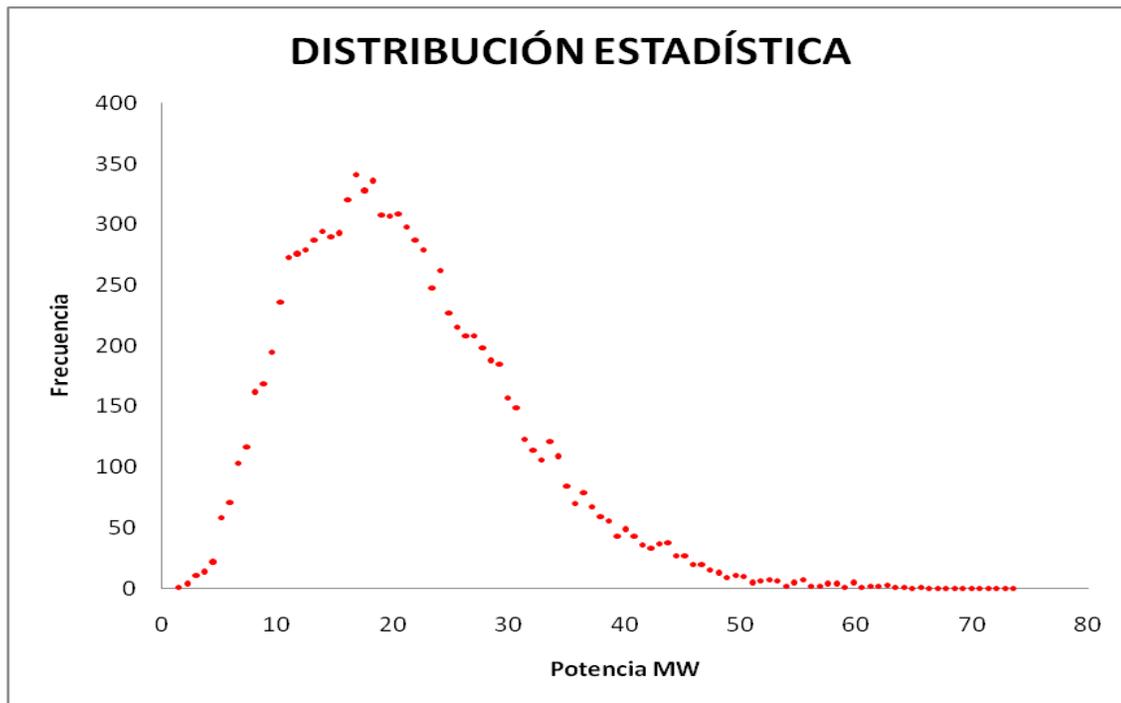


Figura 12. Resultados del modelo volumétrico para Araró

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Araró, Michoacán			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	1.5	4	6.5
Espesor (km)	0.8	1.8	2.4
Temperatura del yacimiento (°C)	190	215	225
Temperatura ambiente (°C)	-4	17.5	31
Humedad relativa (%)	31%	58%	82%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	7%	17%	20%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2200	2500	2900
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.8	0.84	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	10%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.1	2	2.2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **32 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 13 y 14.

El espesor del probable yacimiento fue estimado con base en la profundidad a la que se espera la cima de la secuencia andesítica que podría contener a los fluidos y la base del estrato conductor estimada con sondeos magnetoteléuticos. Se espera una permeabilidad secundaria de media a alta, de acuerdo con lo que se conoce las rocas andesíticas que hospedan al yacimiento en el campo de Los Azufres, aunque para efectos de modelado se reportan las permeabilidades absolutas de la tabla anterior. Se considera que en el subsuelo de la zona hay grandes acuíferos someros y profundos, por lo que la probable recarga profunda sería suficiente para compensar la descarga hasta el máximo de potencial evaluado.

Fuentes consultadas: Departamento de Exploración (1989), Gutiérrez Negrín et al., (1989), Viggiano Guerra y Gutiérrez-Negrín (2003).

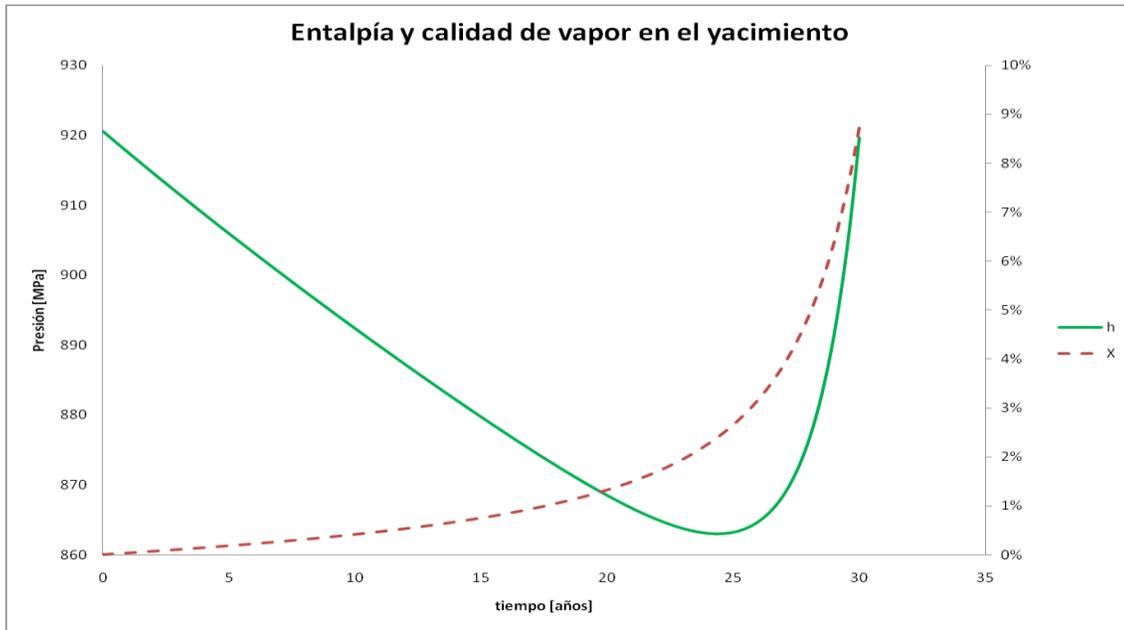


Figura 13. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Araró.

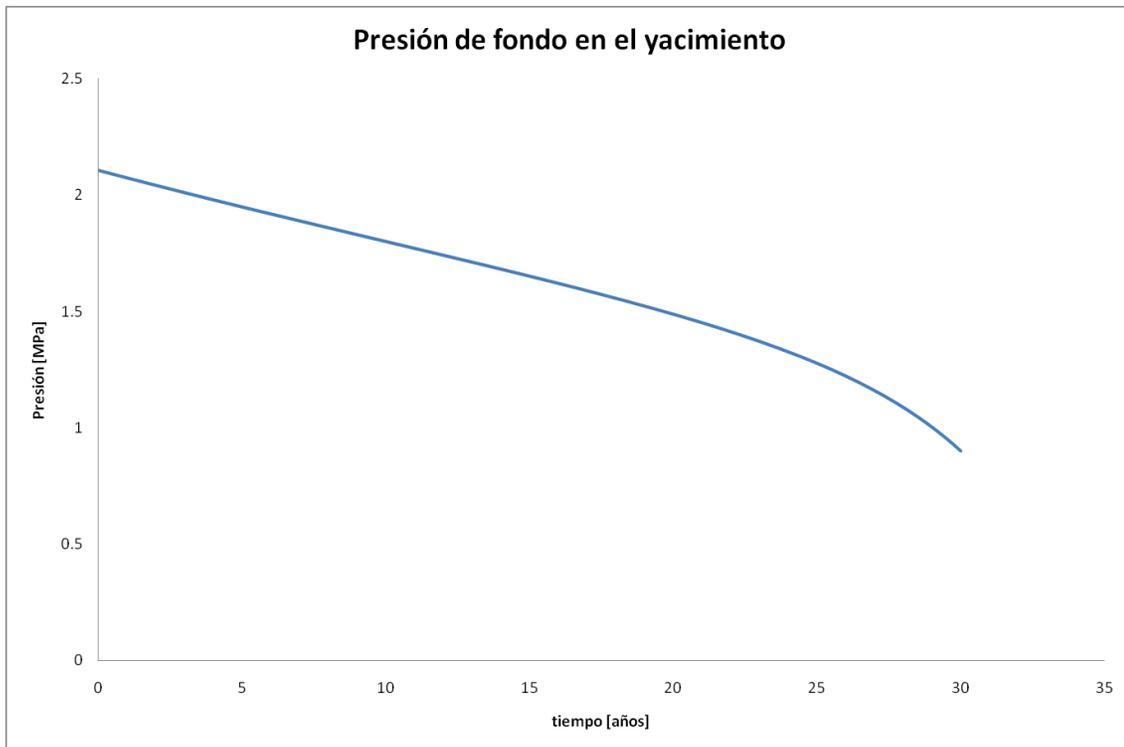
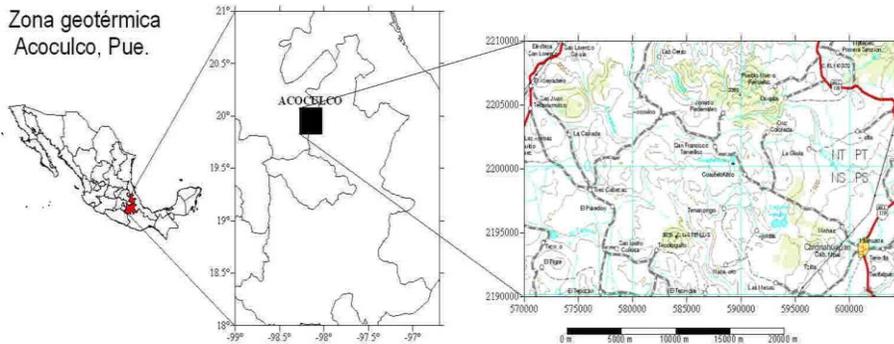


Figura 14. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Araró

ZONA GEOTÉRMICA DE ACOCULCO, PUE.

Localización



La zona se localiza casi en los límites de los estados de Puebla e Hidalgo, en el municipio de Chignahuapan, Pue., a 85 kilómetros al noroeste de la ciudad de Puebla y a 65 kilómetros al sureste

de la ciudad de Pachuca Hgo., entre las coordenadas 19°47' y 20°02' de latitud norte y 97°55' y 98°20' de longitud oeste. Su elevación está entre los 2800 y 2900 msnm. Se tiene acceso a ella por las carreteras federales 199 y 132, a partir de las cuales se siguen diversas carreteras de terracería. Desde el punto de vista fisiográfico, está ubicada en la porción oriental de la Faja Volcánica Mexicana, muy cerca de los límites con la Sierra Madre Oriental.

Características

En la zona afloran rocas volcánicas de edad pliocénica y cuaternaria de composición andesítica y riolítica, así como algunos domos riolíticos. Los manantiales que afloran en ella son relativamente fríos, algunos de ellos con abundante desprendimiento de bióxido de carbono, así como algunas mofetas con temperaturas bajas asociadas con zonas de alteración hidrotermal (caolinización y silicificación) con elevadas concentraciones de boro (hasta 226 ppm). Incluye dos áreas de interés alteradas hidrotermalmente por fluidos de tipo ácido sulfatado, conocidas como Los Azufres-Potrero Colorado y La Alcaparroza. Ambas están asociadas a estructuras de dirección noroeste-sureste, aunque en la región la red estructural es muy compleja y presenta casi todas las orientaciones. Las aguas de los manantiales son de tipo sulfatado ácido y bicarbonatado sódico, probablemente originados por la mezcla de ácido sulfhídrico de origen geotérmico con agua superficial, y con temperaturas de fondo de casi 240°C según el geotermómetro de potasio-sodio. En algunos manantiales termales (49°C) de alrededor, a unos 18 kilómetros de las zonas alteradas, la temperatura de fondo se calculó en 273°C; estos manantiales se consideran como una probable descarga lateral del yacimiento geotérmico del subsuelo. Los gases son CO₂, H₂S, H₂, He, N₂, Ar, Ne, de origen magmático, y se ha encontrado una alta relación isotópica de He en los manantiales de Los Azufres (³He/⁴He = 8.5) considerada como una de las más altas de la Faja Volcánica Mexicana.

De acuerdo con la litología encontrada en los dos pozos exploratorios profundos (1900 y 2000 metros de profundidad) perforados por la CFE, el probable yacimiento geotérmico podría estar contenido en las rocas calcáreas, parcial y localmente metamorfizadas a skarn, que subyace al paquete de rocas volcánicas, y probablemente también en el intrusivo (granito de hornblenda) cortado al fondo.

En general, el probable yacimiento presenta altas temperaturas pero muy baja permeabilidad, por lo que la CFE considera esta zona como candidata para desarrollar en ella un sistema geotérmico mejorado (EGS: *Enhanced Geothermal System*) aplicando técnicas de fracturamiento hidráulico y/o químico

Estudios realizados

Se han efectuado estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos de detalle, y la CFE perforó dos pozos exploratorios: el EAC-1 en 1995 y el EAC-2 en 2008. En el primero (perforado a 2000 metros de profundidad) se midieron 307°C de temperatura, pero con permeabilidad prácticamente nula, aunque se detectaron dos zonas convectivas a 1250 y 1650 metros. En el segundo, perforado a 1900 metros de profundidad, se midieron 264°C de temperatura, se encontró la misma falta de permeabilidad y se detectaron igualmente dos probables zonas convectivas a 1550 y 1850 metros de profundidad. A la fecha la CFE planea realizar más estudios en la zona.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **107 MW** con una desviación estándar de 42 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 38 y 177 MWe.

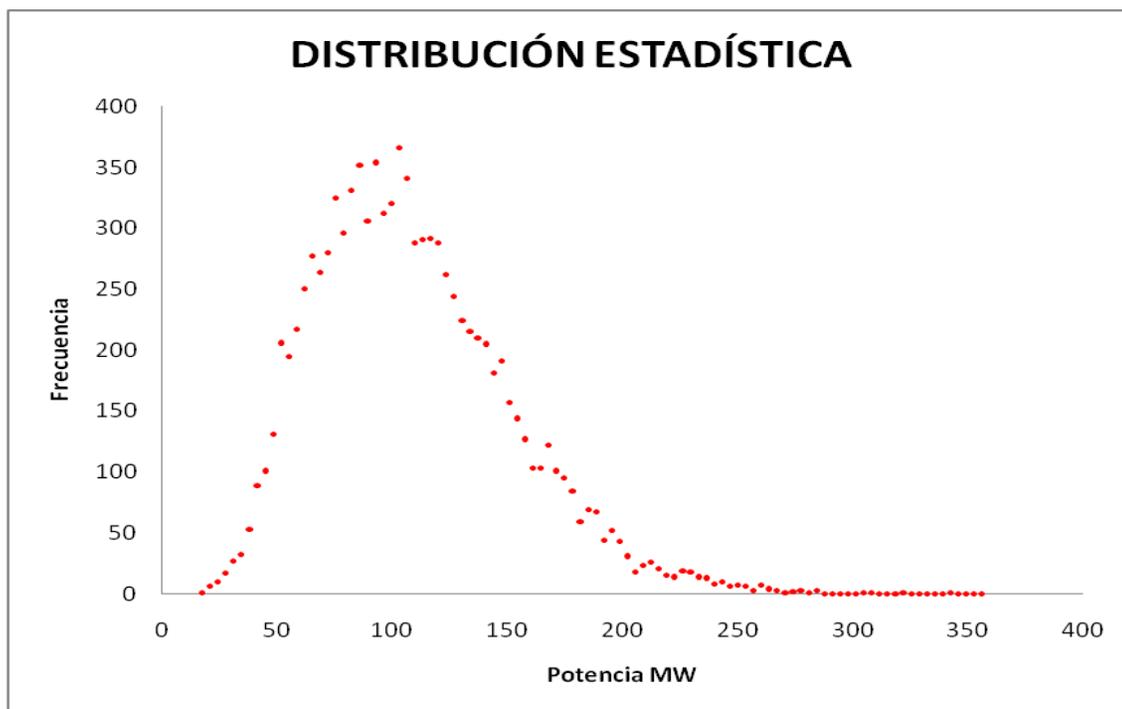


Figura 15. Resultados del modelo volumétrico para Acoculco.

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Acoculco, Puebla			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	2	5	7
Espesor (km)	1.2	2	3
Temperatura del yacimiento (°C)	260	280	300
Temperatura ambiente (°C)	0	20	27
Humedad relativa (%)	48%	63%	78%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	4%	6%	8%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2500	2700	2900
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.84	0.9	1.2
Factor de recuperación Rg (%)	5%	13%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (mildarcy, mD)	0.002	0.01	0.01

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **48 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 16 y 17.

Los espesores probables del yacimiento se estimaron en función de la litología atravesada por los pozos exploratorios de la CFE, aunque el máximo podría ser superior a los 2 kilómetros indicados en la tabla. Para efectos del modelado se estima que aunque las porosidades y permeabilidades de las rocas calientes son muy bajas, ambas podrían ser estimuladas con fracturamiento hidráulico y/o químico para alcanzar valores artificiales suficientes para su explotación comercial con técnicas de sistemas geotérmicos mejorados.

Fuentes consultadas: Gutiérrez Negrín et al. (1989), Lorenzo Pulido et al. (2011), Viggiano Guerra et al. (2011)

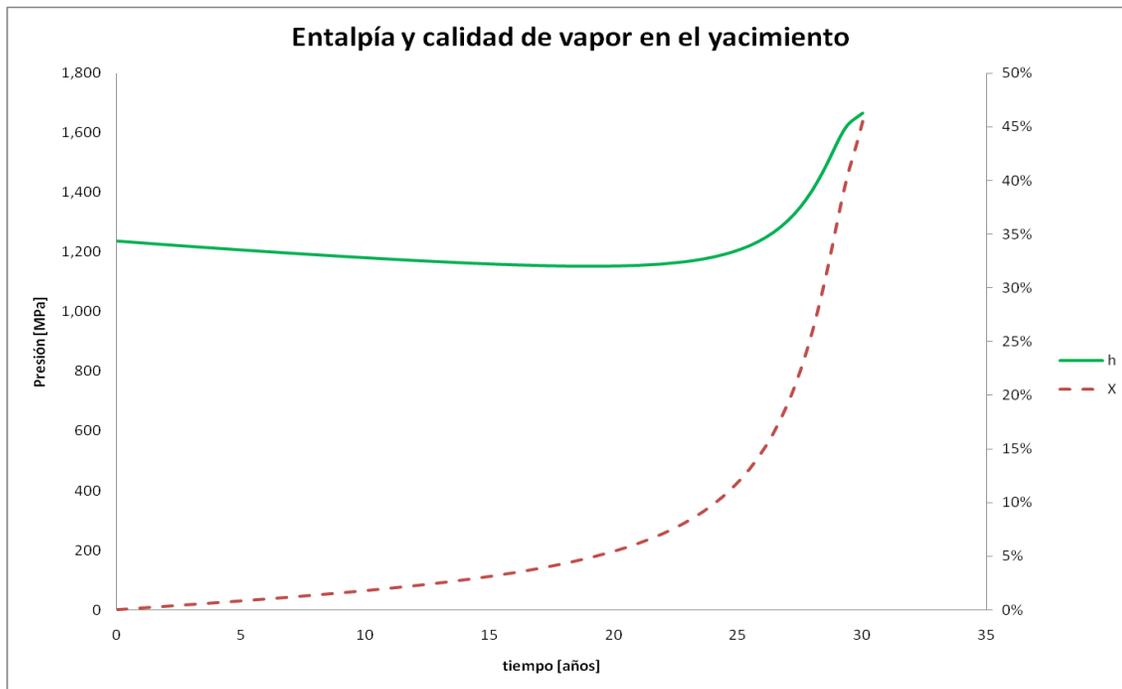


Figura 16. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Acozulco.

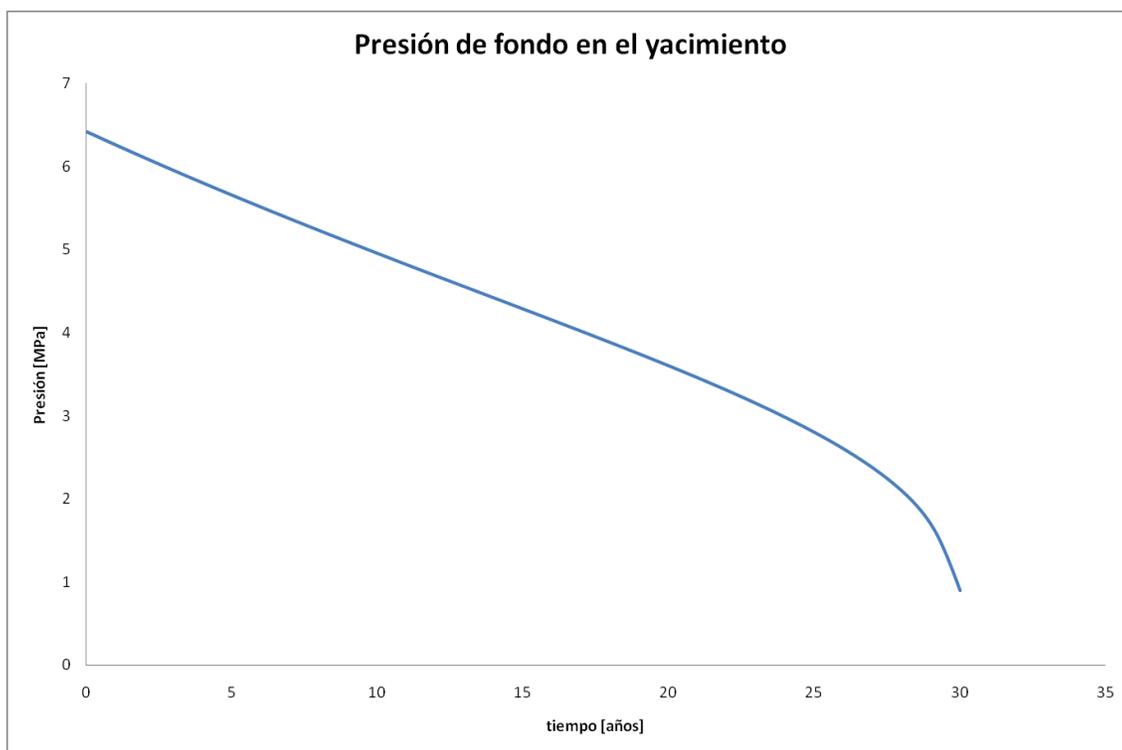


Figura 17. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Acozulco.

ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICH.

Localización

Se ubica en la parte noroccidental del estado de Michoacán, a unos 175 km al noroeste de la ciudad de Morelia, y relativamente cerca del límite con el estado de Jalisco, en las coordenadas 20°10' de latitud norte y 102°23'27", y a una elevación aproximada de 1550 msnm. Las principales vías de acceso son las carreteras Zamora-La Barca (federal número 35) y La Barca-Sahuayo (estatal número 5). La zona está localizada en la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Mexicana, entre las sub-provincias volcánicas del Graben de Chapala y Vulcanismo Cuaternario del Estado de Michoacán.

Características

En el área se ha desarrollado un vulcanismo intenso, que abarca desde fines del Terciario (Mioceno Superior)

hasta el Cuaternario (Pleistoceno Superior). La base de la secuencia son andesitas y basaltos, cubiertos por rocas lacustres (limolitas y dolomías del Plioceno Medio) que rellenan el Graben de Chapala y que a su vez son cubiertas por basaltos y andesitas alcalinas del Plioceno Tardío, que constituyen edificios como los volcanes Nogales y Encinal, así como eventuales conos cineríticos. Entre los afloramientos cuaternarios, los más extensos son de andesitas y basaltos del Pleistoceno Temprano, coronados por abundantes conos cineríticos del Pleistoceno Tardío. La zona se ubica en la prolongación oriental del Graben de Chapala, en la que se observa una serie de fallas normales de dirección noroeste-sureste a este-oeste, algunas de las cuales parecen actuar como conductoras de los fluidos hidrotermales. Las manifestaciones termales ocurren en la intersección entre la Falla Ixtlán-Encinal y la Falla Nogales, entre los poblados de Ixtlán de los Hervores y El Salitre a lo largo de unos 2 km. Consisten en manantiales termales, pozos de agua caliente y volcanes de lodo con temperaturas superficiales entre 48 y 94°C. Varias de ellas presentan depósitos de minerales hidrotermales (sínter silíceo diatomítico, geiserita y arcillas). Las aguas son en su mayoría de tipo clorurado sódico con concentraciones de boro entre 5 y 44 ppm. El geotermómetro de potasio-sodio indica temperaturas de fondo entre 169 y 220°C, mientras que el geotermómetro de gases de D'Amore-Panichi indica temperaturas de 218°C. En la zona se han reportado algunas erupciones hidrotermales, la última de las cuales ocurrió en mayo de 2000, lo que indica una roca sello muy eficiente.

Se considera que el yacimiento podría ser del tipo de fractura ancha y estar contenido en la secuencia andesítico-basáltica del Mioceno que subyace a los productos volcánicos plio-cuaternarios y a los depósitos lacustres del Plioceno. La fuente de calor podría ser alguna de las cámaras magmáticas que ha alimentado al vulcanismo plio-cuaternario.

Estudios realizados

Geología, geoquímica y geofísica de detalle, además de barrenos y pozos exploratorios con profundidades de 35 hasta 1000 metros realizados por la CFE entre 1957 y 1970. Un pozo exploratorio a 50 metros de profundidad, perforado en 1957, fluyó por sí solo de manera

intermitente durante más de 45 años, siendo conocido como el Géiser de Ixtlán. Fue reemplazado en 2005 por otro pozo, perforado por la comunidad a una profundidad de 149 metros.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **17 MW** con una desviación estándar de 7 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 0 y 23 MWe.

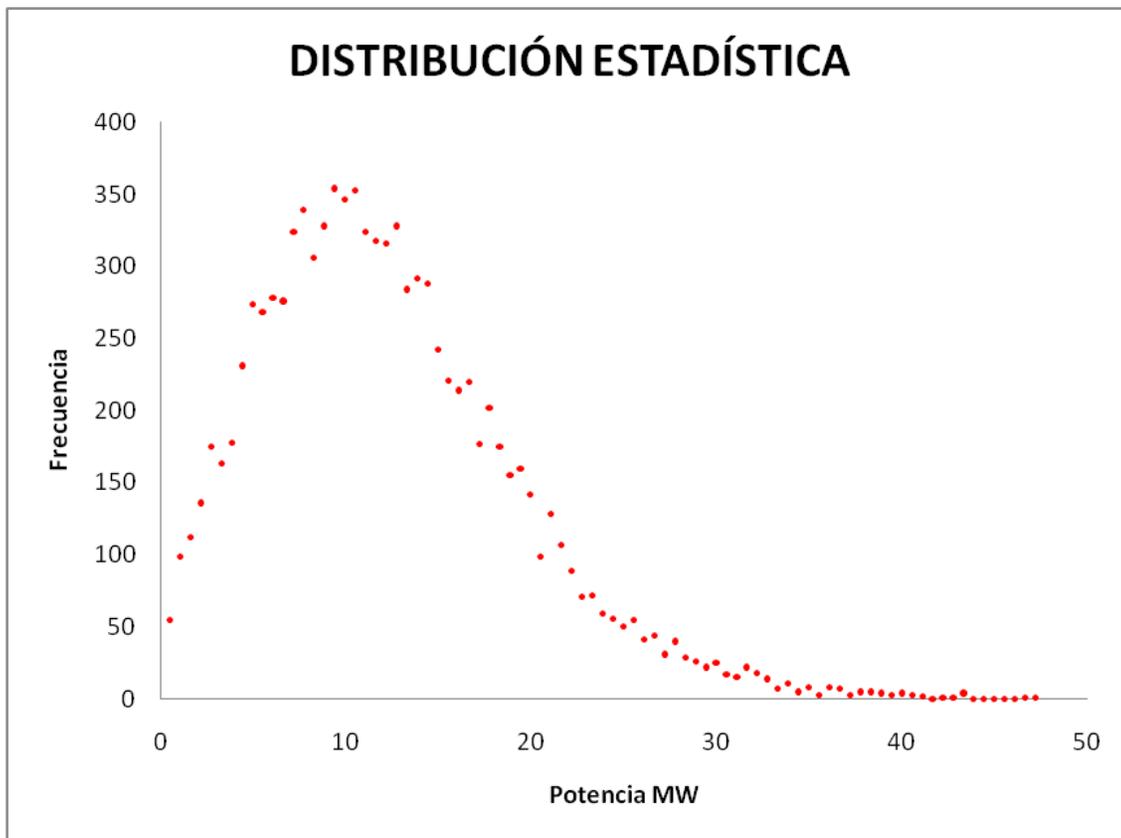


Figura 18. Resultados del modelo volumétrico para Ixtlán de los Hervores

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Ixtlán de los Hervores, Michoacán			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	1	2.5	4
Espesor (km)	0.8	1.5	2.1
Temperatura del yacimiento (°C)	170	220	250
Temperatura ambiente (°C)	4	18	31
Humedad relativa (%)	47%	63%	90%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	5%	13%	20%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2200	2600	2800
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.79	0.82	1.1
Factor de recuperación R _g (%)	5%	10%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.1	2	2.2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **15 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 19 y 20.

El área del probable yacimiento se estimó en función de la extensión de las manifestaciones superficiales y las anomalías resistivas definidas con los estudios geoelectrónicos. Los espesores probables del yacimiento se estimaron con base en las secciones electro-estratigráficas construidas a partir de los datos de los sondeos eléctricos verticales realizados en la zona. La permeabilidad de las rocas del subsuelo se estima entre media y alta, aunque para efectos de modelado se reportan los valores de permeabilidad absoluta indicados en la tabla. No se vislumbran problemas de recarga hidráulica profunda para el probable sistema geotérmico, toda vez que en la zona hay un amplio acuífero somero contenido en los sedimentos lacustres que a través de fallas y fracturas podría recargar al yacimiento, además de que un probable acuífero regional profundo podría hacer lo propio.

Fuentes: Gutiérrez Negrín et al. (1989), Depto. de Exploración (1990), Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín (2007).

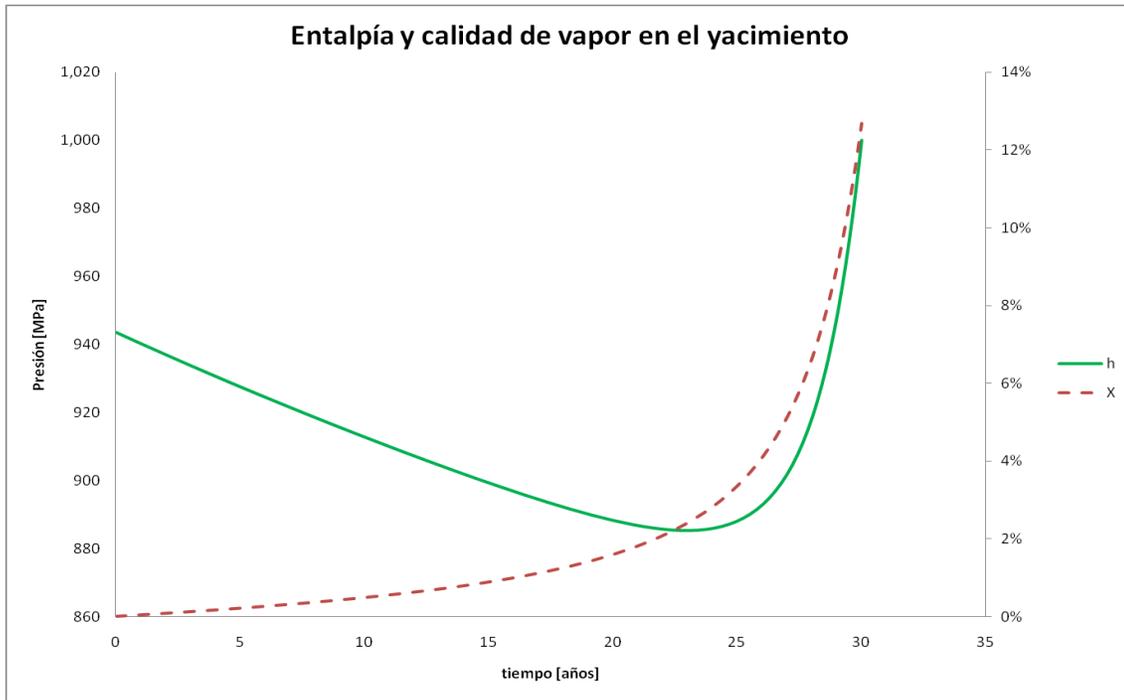


Figura 19. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Los Hervores.

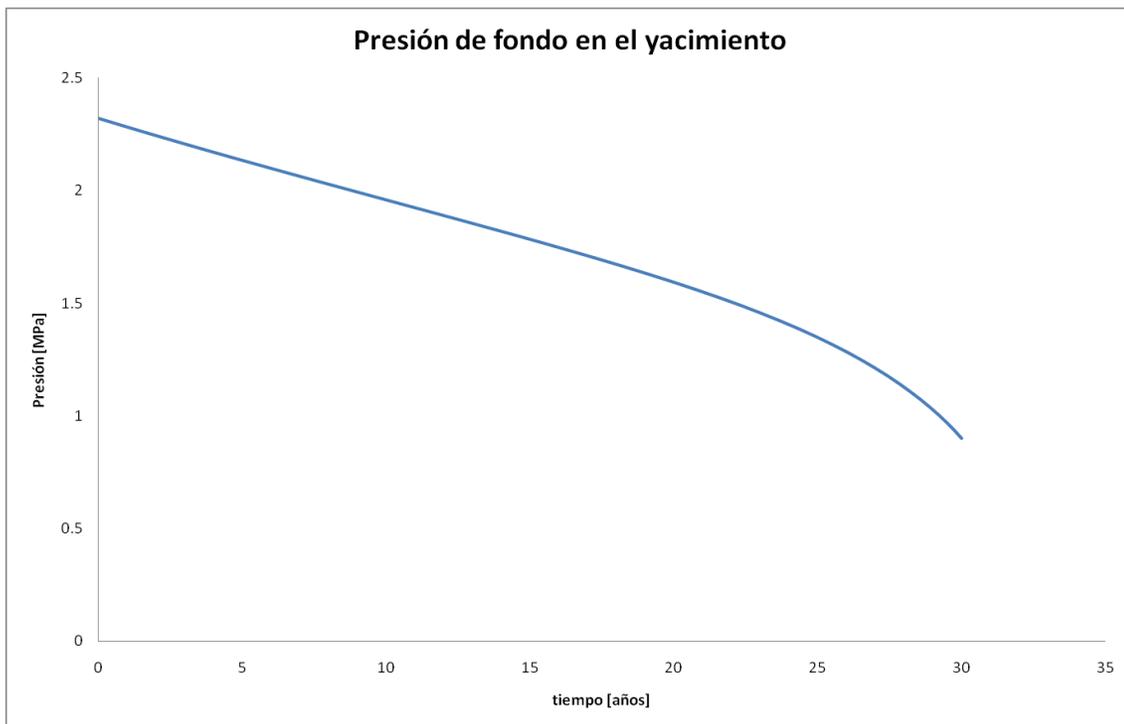


Figura 20. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Los Hervores

ZONA GEOTÉRMICA DE LOS NEGRITOS. MICH.

Localización

Esta zona está situada en el extremo noroeste del estado de Michoacán, a unos 10 km al oriente de la ciudad de Sahuayo, casi en el cruce del paralelo 20°02'24" de latitud norte con el meridiano 102°37'56" de longitud oeste y a unos 1500-1600 msnm de elevación. Se tiene acceso a la zona a través de las carreteras federales números 15 (Zamora-Jiquilpan) y 35 (La Barca-Zamora) y de la estatal número 5 (La Barca-Sahuayo). Fisiográficamente está ubicada en la Faja Volcánica Mexicana, particularmente en su porción central denominada Bloque Michoacán.

Características

La zona se encuentra casi en la confluencia de dos provincias tectónicas conocidas como el Graben de Chapala y la llamada Meseta Tarasca, específicamente al sur de la Ciénaga de Chapala. Son notables en ella fallas regionales de dirección este-oeste, de tipo normal, entre la que destaca la Falla Pajacuarán que parece delimitar el borde sur del Graben de Chapala en la zona y presenta una longitud mínima de 20 km. La zona está en la porción centro-oriental del Valle de Sahuayo, en cuyos alrededores se observan rocas volcánicas con edades del Mioceno al Cuaternario y composición andesítica y basáltica, y aparatos volcánicos monogenéticos de edad plio-cuaternaria. Sedimentos lacustres (limolitas calcáreas) rellenan el valle, sobre el que afloran las manifestaciones termales. Las rocas más recientes son andesitas vítreas de augita extruidas por dos centros eruptivos de edad cuaternaria.

Las manifestaciones termales son manantiales, algunas fumarolas y volcanes de lodo, que parecen relacionarse con el cruce de dos estructuras, determinadas por estudios geofísicas, una de dirección este-oeste (Falla El Platanal) y otra de dirección noreste-suroeste (Falla Los Negritos). Las temperaturas superficiales están entre 30 y 82°C, aunque el geotermómetro de potasio-calcio indica temperaturas de fondo entre los 156 y los 243°C y el geotermómetro de gases de D'Amore-Panichi sugiere temperaturas de 219°C. El agua es de tipo clorurado sódico con concentraciones de boro entre 14 y 67 ppm.

El probable yacimiento geotérmico podría estar contenido en las rocas volcánicas más antiguas, que se estima subyacen a los sedimentos lacustres del valle y presentan una importante permeabilidad secundaria. La fuente de calor estaría relacionada con una cámara magmática profunda alimentadora del vulcanismo más reciente.

Estudios realizados

La CFE ha llevado a cabo estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos de detalle, además de nueve barrenos exploratorios perforados en 1969 a profundidades entre 120 y 630 metros, en el más caliente de los cuales se midieron 164°C a 360 metros de profundidad, aunque otro de ellos registró 120°C a sólo 110 metros de profundidad.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **24 MW** con una desviación estándar de 12 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 3 y 44 MWe.

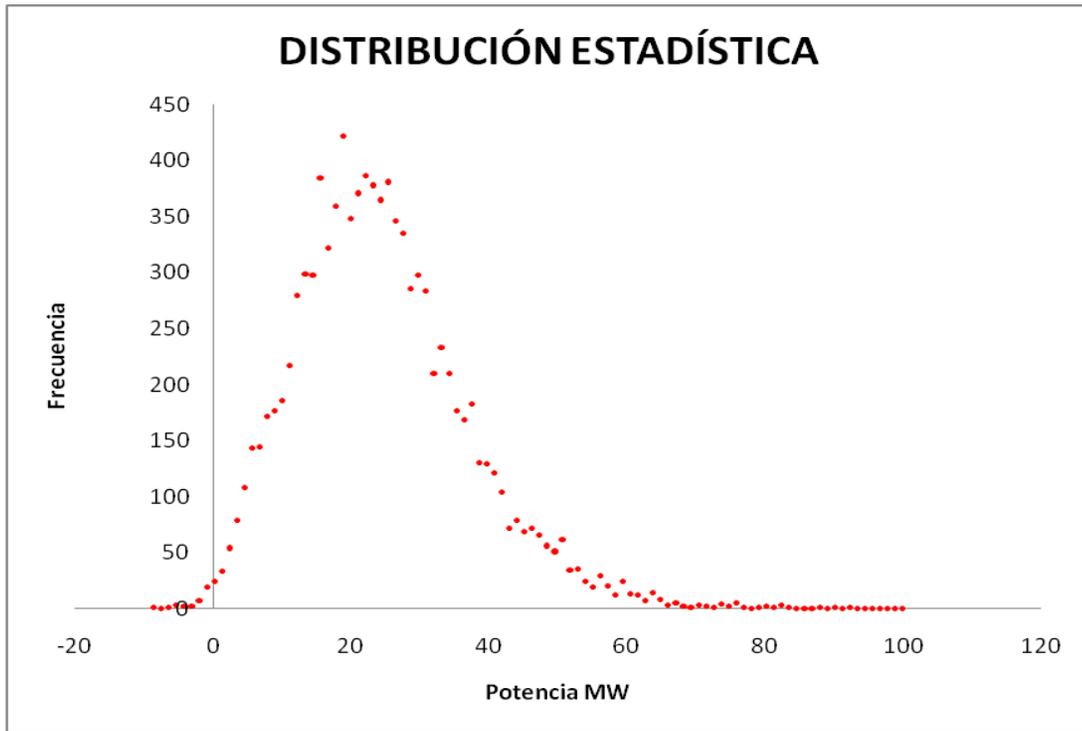


Figura 21. Resultados del modelo volumétrico para Los Negritos

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Los Negritos, Michoacán			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	2	3	4.5
Espesor (km)	1	2	3
Temperatura del yacimiento (°C)	175	220	240
Temperatura ambiente (°C)	4	23.8	31
Humedad relativa (%)	47%	63%	90%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	7%	10%	15%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2400	2600	2800
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.79	0.85	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	13%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (mildarcy, mD)	0.1	2	2.2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **20 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 22 y 23.

El área del probable yacimiento se estimó de acuerdo a la extensión de una anomalía menor de 8 ohm-metro de resistividad aparente que podría asociarse con el yacimiento geotérmico, la cual coincide en parte con las anomalías gravimétricas y magnéticas. Los espesores probables del yacimiento se estimaron a partir del comportamiento electro-estratigráfico observado en secciones geoelectricas. La permeabilidad de las rocas del subsuelo se estima entre media y alta, aunque para efectos de modelado se reportan los valores de permeabilidad absoluta indicados en la tabla. Se estima que el probable sistema geotérmico a profundidad no tendría problemas de recarga profunda, ya que la zona se encuentra en un valle con un potente acuífero somero, contenido en los sedimentos lacustres, que eventualmente podría recargar al yacimiento.

Fuentes: *Gutiérrez Negrín et al. (1989), Depto. de Exploración (1990b).*

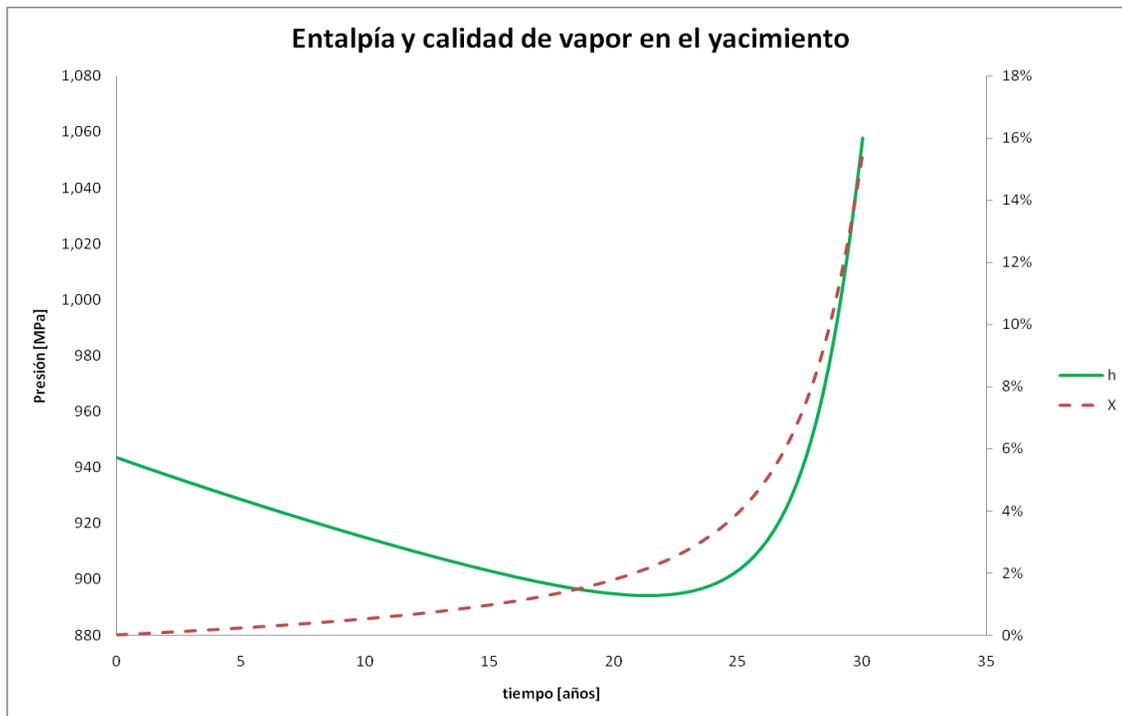


Figura 22. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Los Negritos.

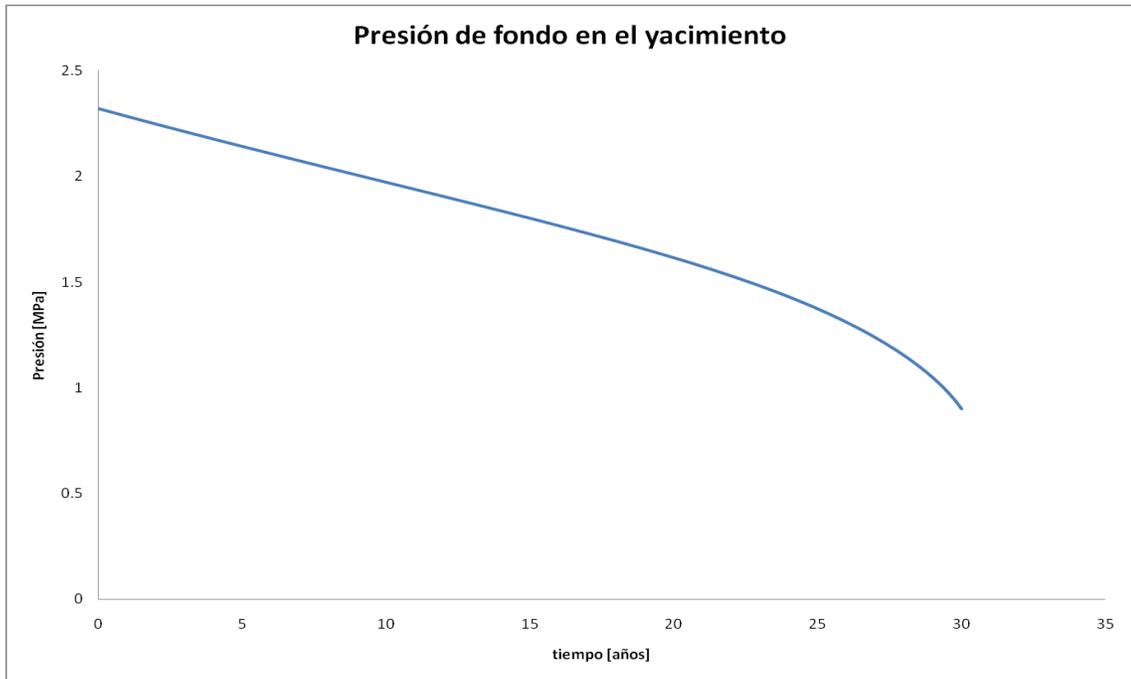


Figura 23. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Los Negritos.

ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN CEBORUCO, NAY.

Localización

Esta zona se encuentra en la parte sureste del estado de Nayarit, a unos 20 km al noroeste de la población de Ixtlán del Río, entre las coordenadas 21°06'-21°18' de latitud norte y 104°28'-104°35' de longitud oeste. Se encuentra a una elevación que fluctúa de unos 1000 msnm en el valle a 2200 msnm en la cima del volcán. Se puede acceder a la zona a través de la autopista de cuota Guadalajara-Tepic o de la carretera federal número 15, saliendo hacia el poblado de Jala. A partir de ahí existe un camino empedrado que llega hasta la cima del volcán donde se encuentra una estación de microondas. Desde el punto de vista fisiográfico, la zona se encuentra en el extremo occidental de la Faja Volcánica Mexicana, cerca del límite con la provincia de la Sierra Madre Occidental.

Características

El Volcán Ceboruco es un estratovolcán de composición que varía de andesítica a riolítica, cuya formación empezó desde el Plioceno y cuyas últimas erupciones de lavas andesíticas y dacíticas ocurrieron en 1875. En las primeras etapas se formó el edificio volcánico principal compuesto por lavas andesíticas y un volumen estimado en 60 km³, así como por algunos aparatos volcánicos satélites en el flanco sureste. Hace unos 1500 años ocurrieron violentas erupciones piroclásticas que dejaron una caldera de 3.7 km de diámetro, en la que se emplazó después un domo dacítico y se formó una segunda caldera con 1.5 km de diámetro. Posteriormente se emplazaron otros domos entre ambas calderas y ocurrieron derrames de lavas andesíticas y dacíticas. Aunque se considera un volcán activo, es poco probable una nueva erupción explosiva.

El volcán se encuentra emplazado en el Graben de Tepic-Zacoalco, de dirección noroeste-sureste, particularmente en la porción conocida como Graben de Ahuacatlán-Jala. Se considera que el graben está actualmente en proceso de *rifting*, es decir sujeto a esfuerzos distensivos. El volcán parece haberse emplazado en una fractura regional de la misma dirección en la que también se formaron otros volcanes monogenéticos menores. El sistema estructural noroeste-sureste es actualmente activo, aunque también hay estructuras pertenecientes a otros sistemas, de dirección noreste-suroeste a casi este-oeste.

Las manifestaciones termales son fumarolas, suelos calientes y manantiales, aunque sólo las dos primeras están directamente asociadas con el volcán. Las fumarolas del volcán presentan temperaturas entre 82 y 92°C; los gases de las fumarolas del llamado cráter Cinco Bocas son típicos de sistemas geotérmicos de alta temperatura, con temperaturas de fondo entre 211 y 263°C calculadas con el geotermómetro de D'Amore-Panichi.

Se estima que el probable yacimiento geotérmico estaría contenido en la secuencia de rocas andesíticas, basálticas, riolíticas y piroclásticas que constituye el basamento de la Faja Volcánica Mexicana y/o el final de la Sierra Madre Occidental, restringido en superficie a un área equivalente a la que ocupa la primera caldera (de 3.5 km de diámetro). Esta podría ser la

razón por la cual el pozo exploratorio profundo que se menciona a continuación no encontró temperaturas elevadas.

Estudios realizados

La CFE realizó estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos de detalle en la zona del Volcán Ceboruco y sus alrededores, y perforó siete pozos de gradiente, uno de ellos (identificado como GC-7) a 547 m de profundidad y ubicado hacia el flanco suroeste del volcán. Adicionalmente, en 1994 perforó un pozo exploratorio profundo, denominado CB-1, que se localizó de manera coincidente con el pozo de gradiente GC-7 a unos 5 km de la cima del volcán. El pozo llegó a 2800 metros de profundidad, con temperatura máxima de 115°C.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de 74 MW con una desviación estándar de 24 MW y el intervalo de con fianza al 90% es de entre 34 y 113 MWe.

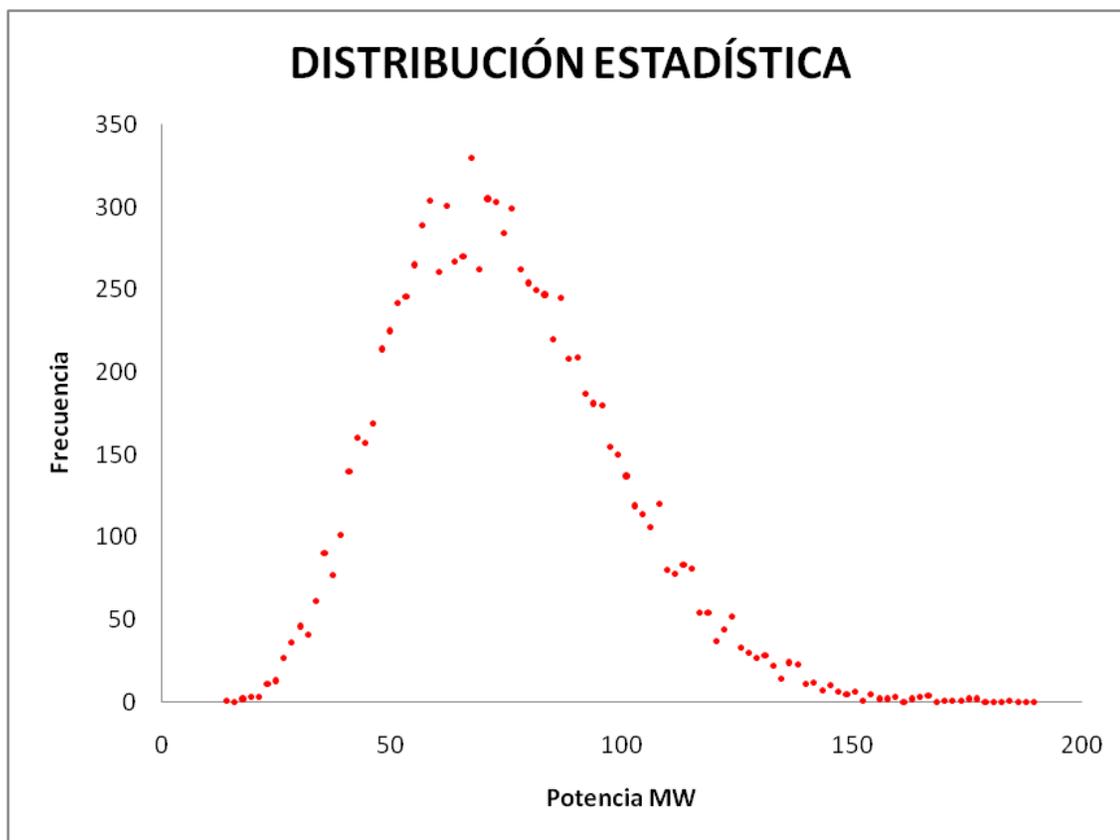


Figura 24. Resultados del modelo volumétrico para Volcán Ceboruco

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Volcán Ceboruco, Nayarit			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	3.8	5	9.5
Espesor (km)	1.5	2	3
Temperatura del yacimiento (°C)	220	240	260
Temperatura ambiente (°C)	0	22	35
Humedad relativa (%)	40%	67%	96%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	5%	11%	18%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2500	2600	2900
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.79	0.82	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	13%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.1	2.0	2.2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de 50 MW y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 25 y 26.

El área del probable yacimiento fue estimada con base en dos parámetros: la extensión de las anomalías resistivas en la cima del volcán (que cubre la totalidad de la segunda caldera y partes de la primera) y un máximo equivalente al diámetro de la primera caldera. El espesor se estimó a partir de los espesores aflorantes de la cercana Sierra Madre Occidental y los estimados para los paquetes volcánicos subyacentes. La permeabilidad para las rocas del probable yacimiento se estima de media a elevada, si bien los valores de permeabilidad absoluta obtenidos de la literatura son los que se reportan en la tabla previa. No se prevén problemas de recarga profunda porque se conocen importantes acuíferos superficiales en el valle.

Fuentes: Gutiérrez Negrín et al. (1989), Depto. de Exploración (1989c), Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín (1994).

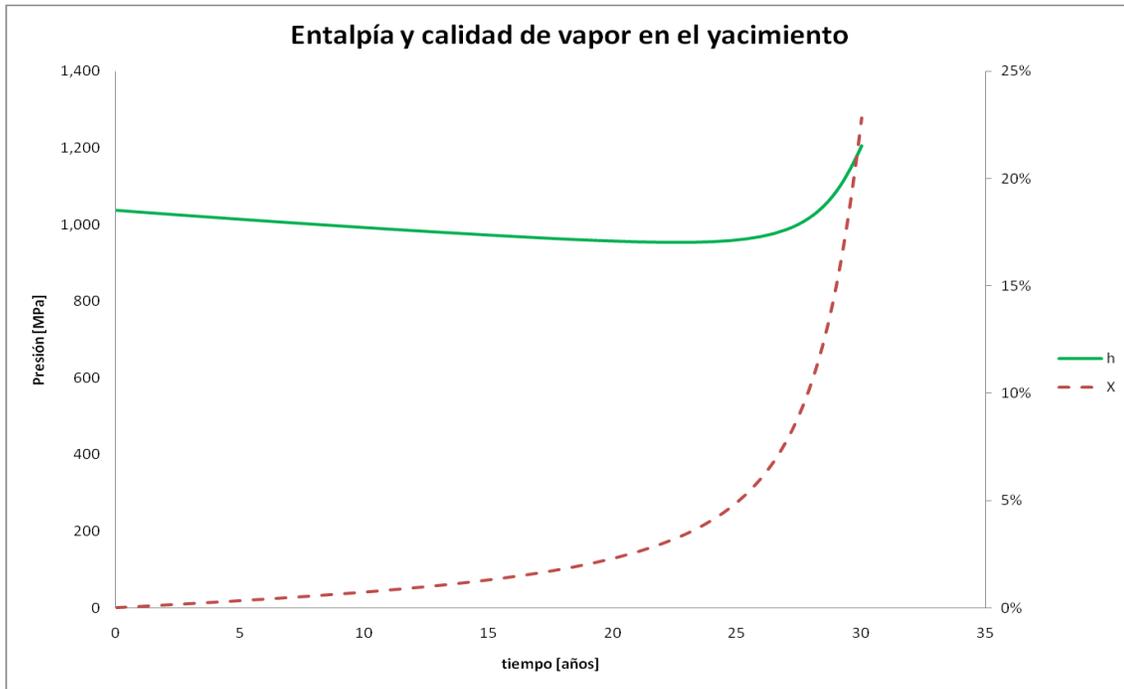


Figura 25. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico del Volcán Ceboruco.

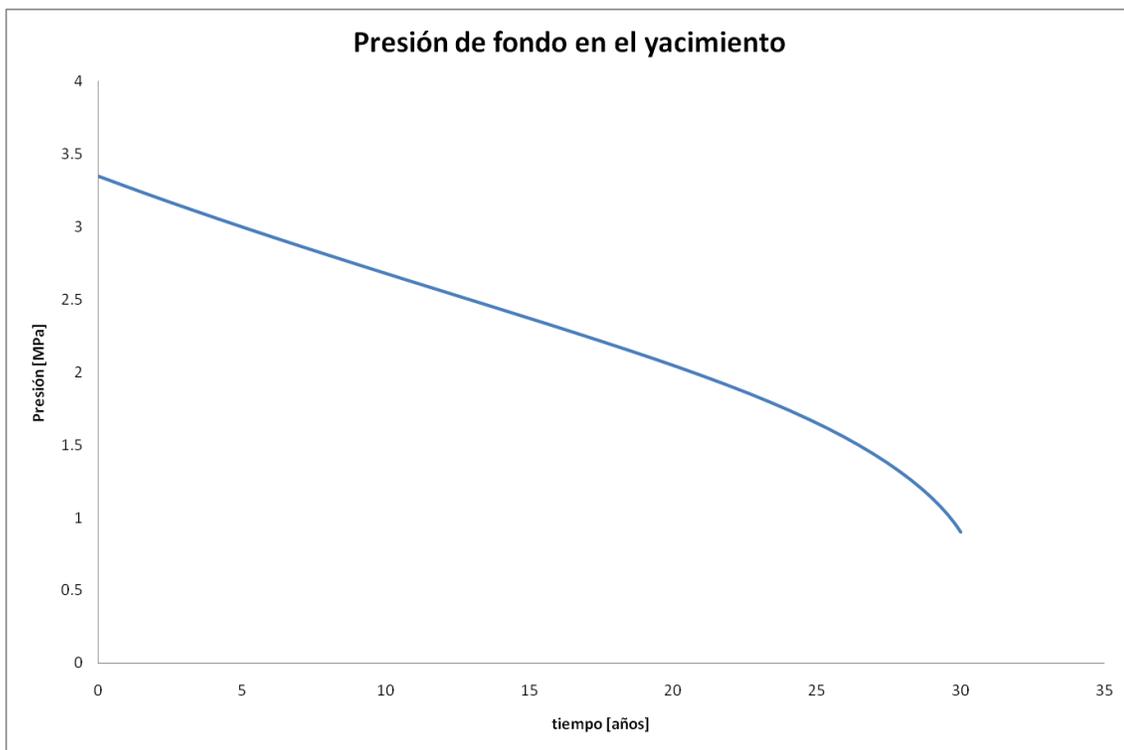


Figura 26. Evolución de la presión para el campo geotérmico del Volcán Ceboruco.

ZONA GEOTÉRMICA DEL GRABEN DE COMPOSTELA, NAY.

Localización

La zona se localiza en la porción sur del estado de Nayarit, a unos 19 km al sureste de la ciudad de Compostela y a unos 5 km al sur del poblado de San Pedro Lagunillas, en las coordenadas 21°09'46" de latitud norte y 104°43'18" de longitud oeste. El acceso es a través de la autopista de cuota Guadalajara-Tepic o de la carretera federal número 15, saliendo hacia Compostela. Desde el punto de vista fisiográfico, la zona se encuentra en el extremo occidental de la Faja Volcánica Mexicana, presentándose hacia el sur la provincia de la Sierra Madre del Sur y hacia el occidente la de la Sierra Madre Occidental.

Características

Se trata de un conjunto de domos de composición predominantemente dacítica y con edades entre 0.85 y 0.04 millones de años, alineados en una dirección general NW-SE. Los domos están asociados a flujos piroclásticos, pómez y ceniza y probablemente a los manantiales termales de Las Cuevas. La actividad volcánica en la zona incluye la emisión de otros domos de composición andesítica a riolítica y edades entre 0.5 y 0.1 millones de años. La estructura y composición de todos ellos sugieren la presencia de cámaras magmáticas diferenciadas y relativamente someras, susceptibles de actuar como fuente de calor para un probable yacimiento geotérmico.

Los domos están en la porción noroeste del Graben de Tepic-Zacoalco, de dirección noroeste-sureste, en particular en la prolongación de la parte identificada como Graben de Compostela. En general, hay consenso en que el graben sufre un proceso de *rifting*, lo que implica que está sujeto a esfuerzos distensivos. Los domos parecen emplazarse en una fractura regional de la misma dirección noroeste-sureste, que pertenece al sistema estructural más importante. Este sistema noroeste-sureste parece ser actualmente activo, toda vez que algunas de sus estructuras se encuentran afectando a rocas cuaternarias. También se encuentran en la zona estructuras de orientación noreste-suroeste con variación hasta este-oeste.

Hay pocos manantiales termales cercanos a los domos, y presentan temperaturas superficiales de 34°C y aguas de composición bicarbonatada sódica. Sin embargo, un pozo exploratorio perforado por la CFE en 1994 (pozo CB-3), ubicado a un kilómetro al noreste de la base de los domos, produjo pequeñas cantidades de agua de tipo clorurado sódico y se le midió una temperatura de 209°C al fondo (1911 metros). Los geotermómetros aplicados a muestras de esta agua calcularon temperaturas de fondo entre 217 y 246°C.

El probable yacimiento geotérmico podría alojarse en rocas intrusivas (granitos) y/o sedimentarias (calizas), así como en rocas volcánicas (alternancias de andesitas, dacitas y rocas piroclásticas), con una permeabilidad secundaria de media a alta.

Estudios realizados

La CFE ha realizado campañas exploratorias intensas, consistentes en métodos eléctricos (SEV's y TEM's), estudios magnéticos, gravímetros, diversos estudios de geología,

geoquímica y geofísica, además de perforar varios pozos de gradiente en la zona del Graben de Compostela y tres pozos de diseño geotérmico exploratorio profundos. Como se indicó antes, el único pozo profundo con características sobresalientes fue el denominado CB3, presentando temperatura superior a los 200°C, aunque una permeabilidad aparentemente escasa.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **105 MW** con una desviación estándar de 42 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 35 y 175 MWe.

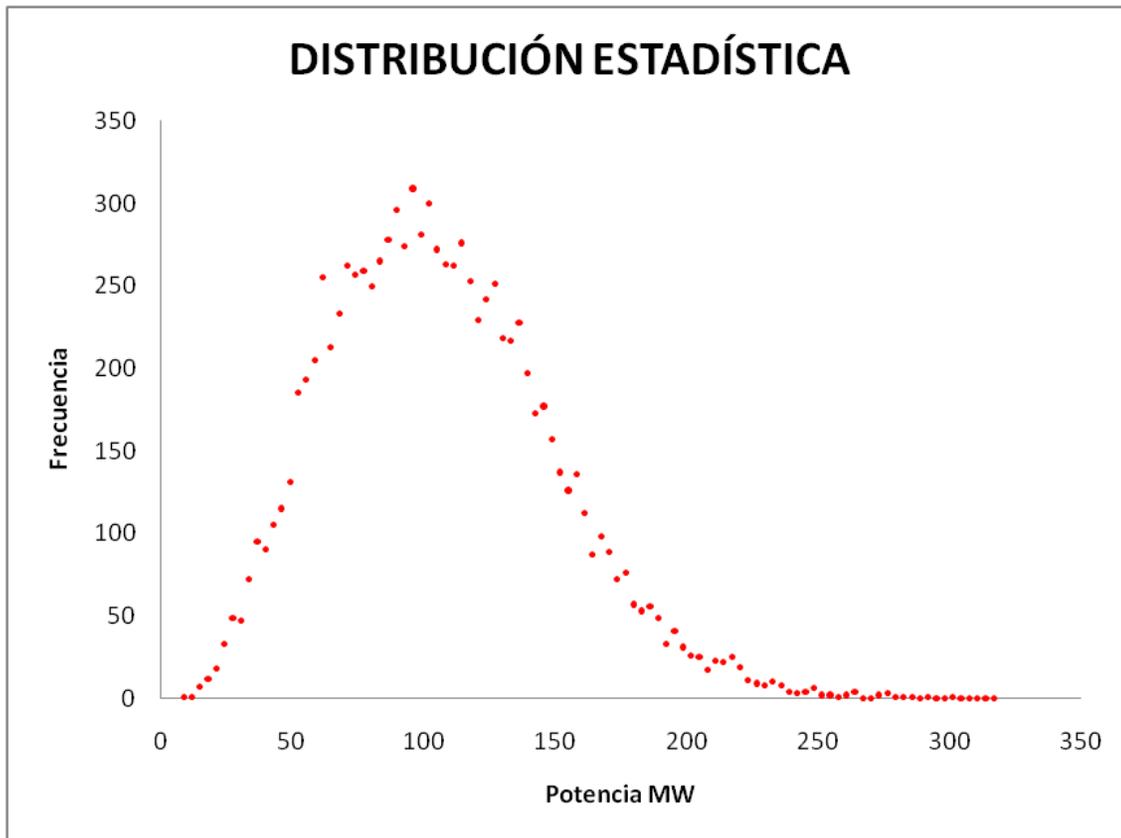


Figura 27. Resultados del modelo volumétrico para Graben de Compostela

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Graben de Compostela, Nayarit			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	3	10	13
Espesor (km)	1	3	3.5
Temperatura del yacimiento (°C)	200	225	250
Temperatura ambiente (°C)	1	22	35
Humedad relativa (%)	40%	67%	96%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	4%	10%	15%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2500	2700	2900
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.79	0.84	1.1
Factor de recuperación R _g (%)	5%	10%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.1	2	2.2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **110 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 28 y 29.

El área mínima del yacimiento se estimó considerando un 25% de la superficie ocupada por las principales edificios volcánicos comprendidos en el graben, y la máxima un 50% de la misma. El espesor se estimó con base en la litología del subsuelo cortada por el pozo exploratorio CB-3 y las características estructurales del área. Se considera que la permeabilidad secundaria de las rocas del yacimiento, sean de tipo intrusivo o volcánico, podría ser alta considerando sus características de fracturamiento. Igualmente, se considera que no habría problemas de recarga profunda para el probable yacimiento, hasta la máxima potencia modelada.

Fuentes: Arredondo(2005).

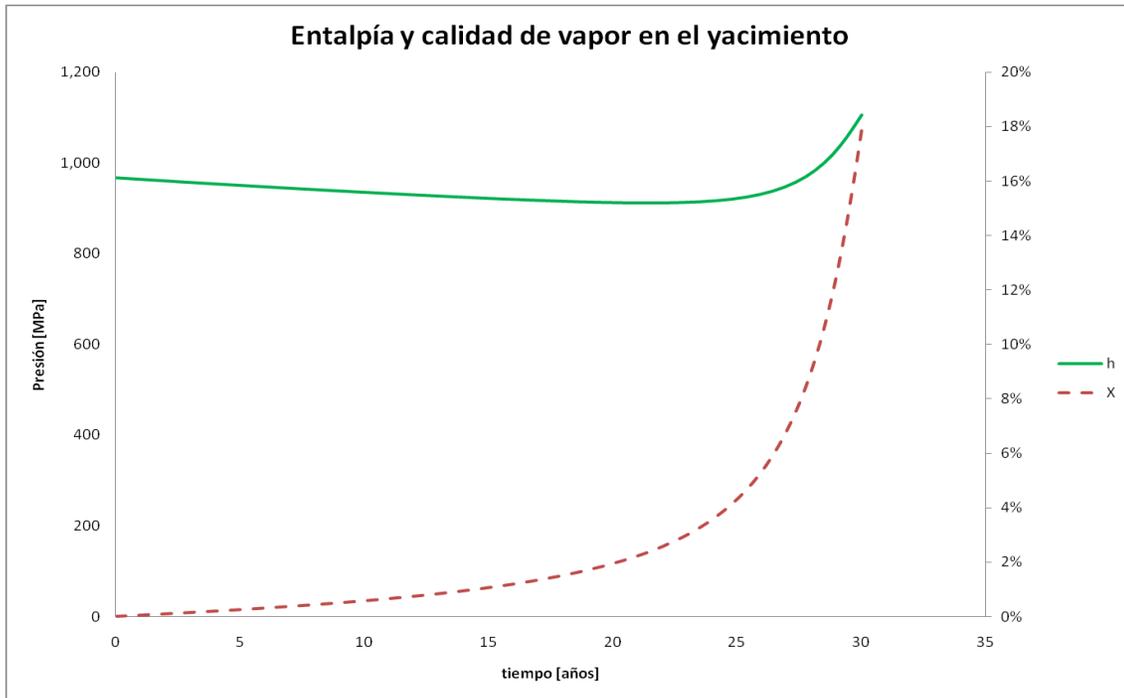


Figura 28. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico del Graben de Compostela.

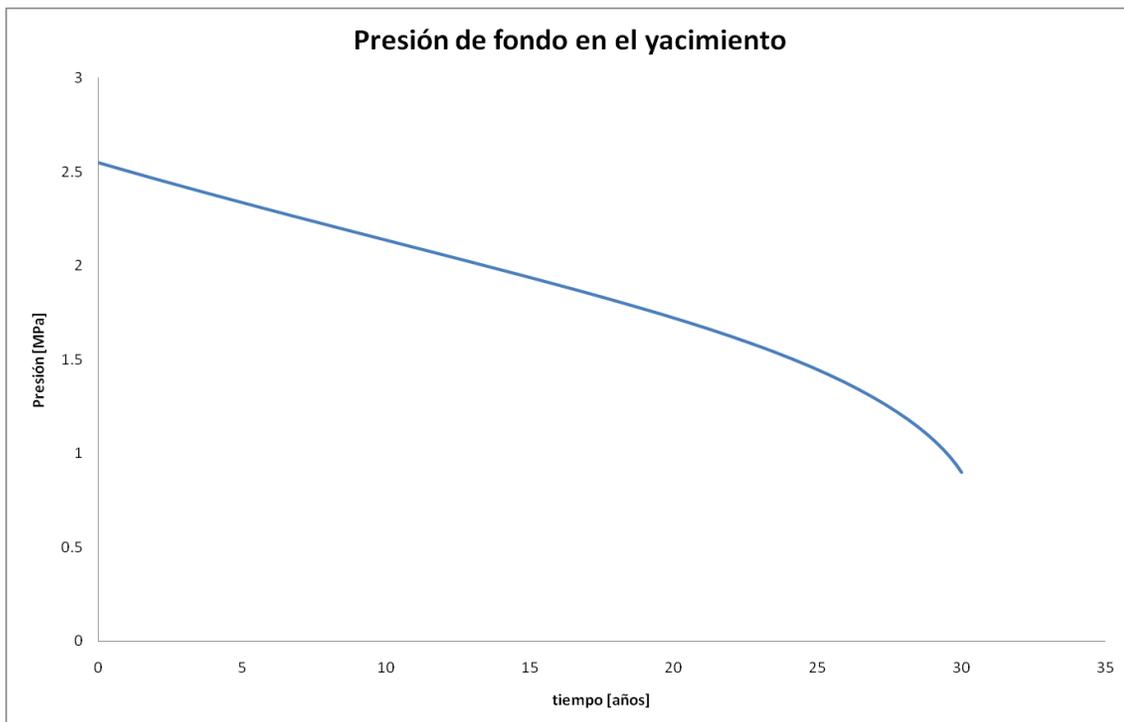


Figura 29. Evolución de la presión para el campo geotérmico del Graven de Compostela.

ZONA GEOTÉRMICA DE SAN ANTONIO EL BRAVO (OJINAGA), CHIH.

Localización

Se ubica en la parte noreste del estado de Chihuahua, a unos 80 km al noroeste de la ciudad de Ojinaga y aproximadamente 215 km en línea recta al noreste de la ciudad de Chihuahua, inmediatamente al sur del Río Bravo en la frontera con Estados Unidos. La zona se halla en las coordenadas 30°05' de latitud norte y 104°45' de longitud oeste, a unos 950 msnm. Puede accederse a ella por un camino de terracería que parte de Ojinaga hacia el poblado de San Antonio El Bravo, bordeando el Río Bravo. Fisiográficamente pertenece a la porción meridional de la provincia de Sierras y Valles, aunque algunos autores la consideran en el límite entre las provincias de la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental.

Características

La zona se encuentra en un valle conocido localmente como Graben de Presidio y que se considera como la prolongación sur-oriental del Rift del Río Grande. Este rift es una depresión continental que se expresa claramente al norte, en territorio norteamericano, donde han ocurrido adelgazamientos de la corteza continental que provocan incrementos regionales del flujo térmico. Se supone que empezó a formarse hace unos 28 millones de años, pero el fenómeno de *rifting* continúa activo hasta la fecha de manera intermitente provocando sismos y microsismos. En la zona afloran rocas sedimentarias, intrusivas, volcánicas y depósitos continentales con edades del Jurásico al Cuaternario, aunque no hay evidencias de vulcanismo reciente. Las fallas asociadas al rift son de tipo normal, orientación general norte-sur a noroeste-sureste que forman grandes depresiones con espesores de hasta 2000 metros de sedimentos cuaternarios. Hay también fallas laterales de dirección este-oeste.

La zona incluye 11 manantiales termales que afloran en dos áreas. Una puede seguirse a lo largo de unos 300 metros en las márgenes del Arroyo Ojo Caliente, con temperaturas entre 36 y 91°C, depósitos de travertino y sales y desprendimientos de H₂S. En esta área el termalismo está asociado a la Falla Ojo Caliente, de dirección norte-sur. La otra área se conoce como El Infiernito, con temperaturas menores (36-60°C) y también con depósitos de travertino. El agua de los manantiales es de tipo sódico mixto, con cantidades moderadas de boro (1.4 ppm). El geotermómetro de potasio sodio calcula temperaturas de fondo entre 226 y 233°C y el de sodio-potasio entre 209 y 218°C. Los gases analizados en algunos de los manantiales son característicos de sistemas geotérmicos.

Se considera posible la existencia de un yacimiento geotérmico de temperatura moderada en el subsuelo de la zona, alojado en la secuencia de rocas volcánicas (ignimbritas y riolitas) intercaladas con sedimentos tipo molasa de edad oligo-miocénica que subyace a los potentes depósitos de sedimentos cuaternarios, e incluso en la porción inferior de estos. La fuente de calor sería la anomalía térmica regional provocada por el adelgazamiento de la corteza debido al proceso de *rifting*. En este ambiente, más que la permeabilidad, el factor determinante será la temperatura del subsuelo.

Estudios realizados

La CFE realizó estudios geológicos, geoquímicos y algunos estudios geofísicos en la zona en la década de los ochenta, pero sin duda serán necesarios más estudios de exploración antes de planear un pozo exploratorio. Los escasos estudios de resistividad indican una zona anómala pequeña de. La actividad tectónica actual, la posible presencia en el subsuelo de formaciones porosas y permeables, la anomalía térmica regional y las favorables características geoquímicas son buenos indicios del probable yacimiento, pese a la ausencia de vulcanismo reciente.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **27 MW** con una desviación estándar de 10 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 10 y 43 MWe.

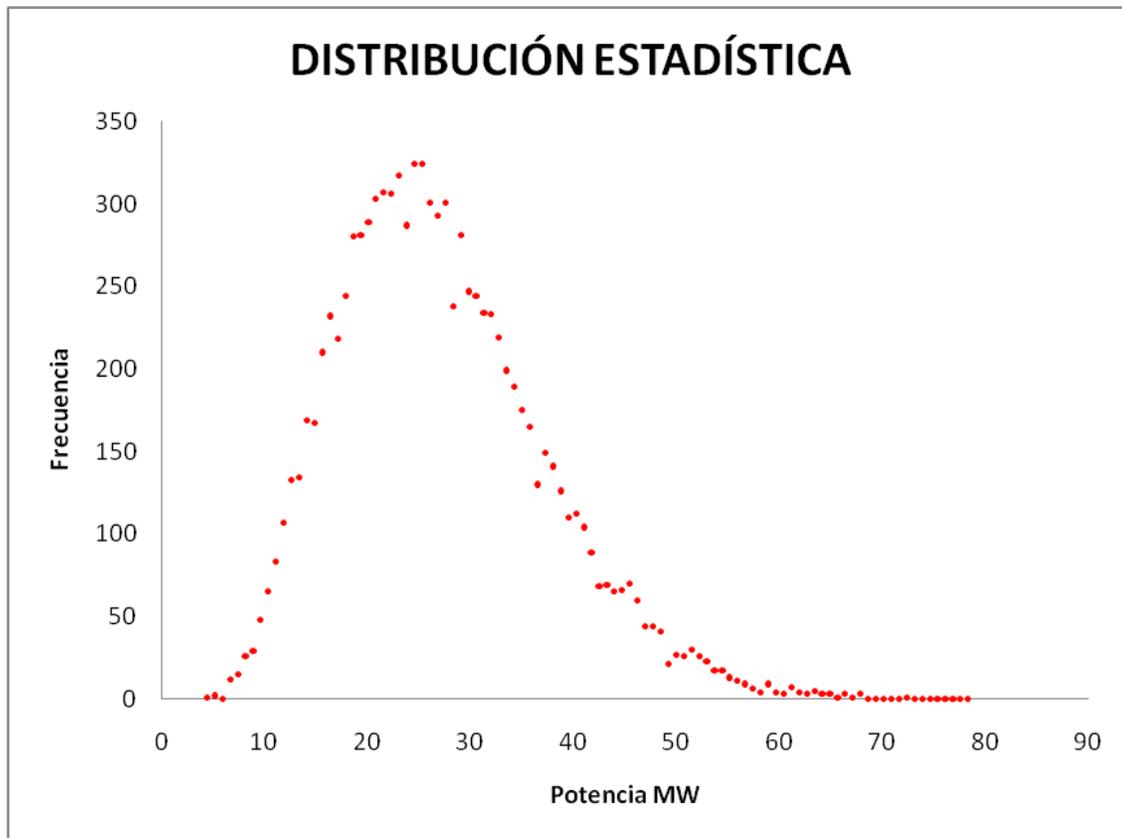


Figura 30. Resultados del modelo volumétrico para San Antonio El Bravo, Ojinaga.

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

San Antonio El Bravo (Ojinaga), Chihuahua			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	2	4.5	6.5
Espesor (km)	1.5	2	3
Temperatura del yacimiento (°C)	200	215	230
Temperatura ambiente (°C)	1	19	38
Humedad relativa (%)	24%	48%	77%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	4%	15%	20%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2000	2300	2500
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.79	0.8	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	10%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	2	10	15

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **36 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 31 y 32.

El área del probable yacimiento se estimó con base en la anomalía resistiva, que se supone de un máximo de 1 km². El espesor se estimó con base en las secciones estructurales levantadas por la CFE. Se considera que la permeabilidad de las rocas del yacimiento sería elevada y que habría también la suficiente recarga profunda para el yacimiento, hasta la máxima potencia modelada.

Fuentes: Gutiérrez Negrín et al. (1989), Depto. de Exploración (1990c).

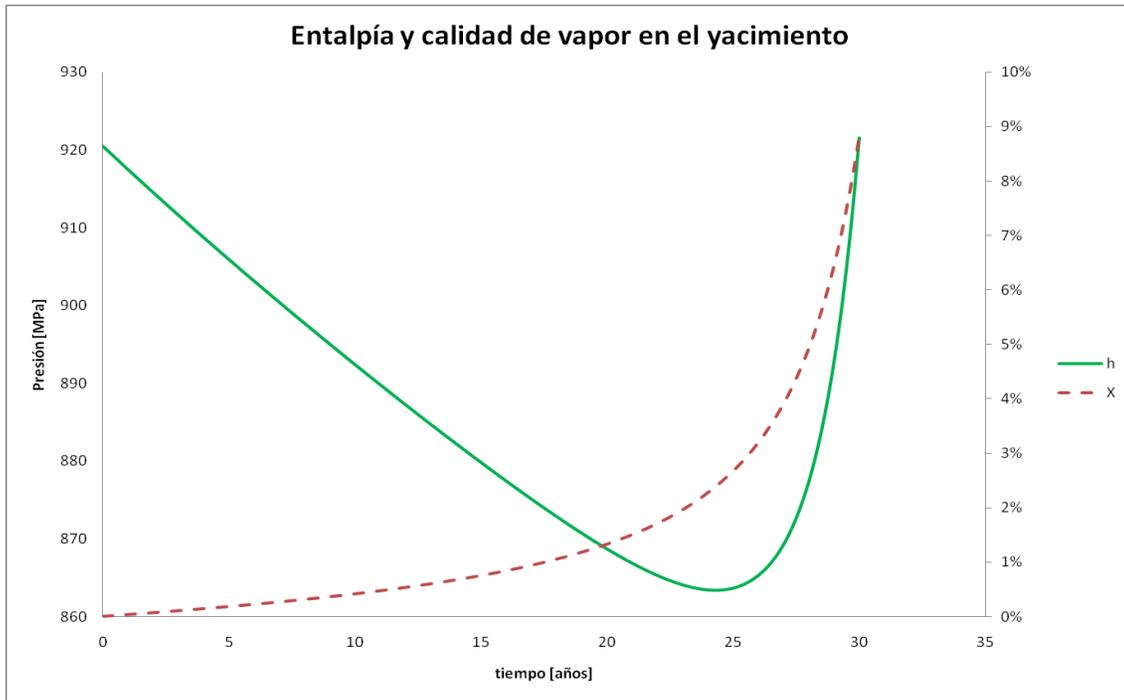


Figura 31. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de San Antonio El Bravo.

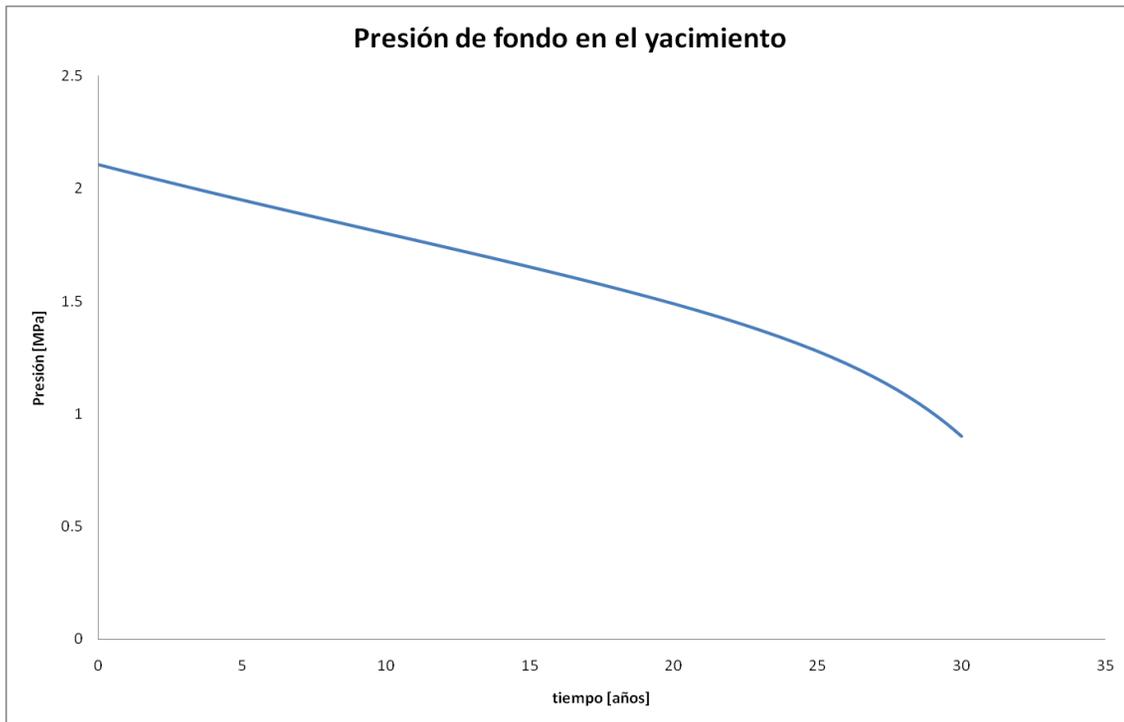
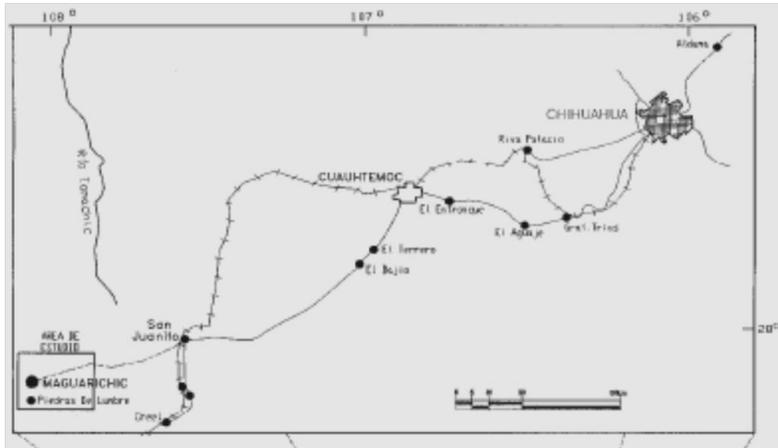


Figura 32. Evolución de la presión para el campo geotérmico de San Antonio El Bravo.

ZONA GEOTÉRMICA DE MAGUARICHIC, CHIH.

Localización



Se localiza en la parte suroeste del estado de Chihuahua, a unos 350 km al suroeste de la ciudad capital de Chihuahua, en plena Sierra Tarahumara, en las coordenadas 27°52'30" de latitud norte y 107°59'30" de longitud oeste, a una elevación media de 2000 msnm. Partiendo de Chihuahua, es posible acceder a la zona a través de la carretera federal número 16, y

tomar el entronque hacia San Juanito. De aquí parte una carretera de terracería de 60 km hasta el poblado de Maguarichic. La zona geotérmica, conocida localmente como Piedras de Lumbre, se encuentra a unos 9 km de este poblado. La zona pertenece a la provincia de la Sierra Madre Occidental, estando muy cercana a la provincia de Cuencas y Sierras.

Descripción

El área de interés y las manifestaciones termales se ubican prácticamente en la parte superior de un potente paquete volcánico de composición intermedia y de edad Oligoceno-Mioceno, constituido por diversos derrames andesíticos, que se intercalan con depósitos vulcano-sedimentarios, y con algunos derrames riódacíticos, sobreyacidos por ignimbritas miocénicas y coronadas por vitrófidos riolíticos del Mioceno-Plioceno. No existen evidencias de vulcanismo cuaternario. En la zona se presentan dos sistemas estructurales bien definidos. El más antiguo tiene una orientación noreste-suroeste y posiblemente está asociado a una fase compresiva de fines del Mioceno, y el más reciente, de orientación desde noroeste-sureste a norte-sur, parece asociarse a la fase distensiva de la provincia de Cuencas y Sierras, como resultado de una extensión de dirección noreste-suroeste. A este sistema estructural se asocian las manifestaciones termales más importantes, que son claramente controladas por estructuras pertenecientes a él, en particular la Falla Recubichi.

Se han identificado 96 manifestaciones termales (manantiales, fumarolas, hervideros), con temperaturas de 30 a 94°C y una media de 80°C. Los manantiales tienen un gasto conjunto estimado en 47 litros por segundo, y varios de ellos presentan desprendimiento de gases, depósitos de sales y extensas zonas de alteración hidrotermal (silicificación, caolinización y propilitización). Las manifestaciones se agrupan en ocho áreas termales, de las cuales las más importantes son las de Recubichi y Piedras de Lumbre, que concentran el 85% de las manifestaciones superficiales con una superficie conjunta de unos 7 km². El agua de los manantiales es de tipo bicarbonatado sódico, y el geotermómetro de gases de D'Amore-Panichi estima una temperatura de fondo de 151 a 154°C.

El probable yacimiento geotérmico a profundidad estaría contenido en la secuencia volcánica inferior, de edad Oligoceno-Mioceno, compuesta por andesitas con intercalaciones de riodacitas y una secuencia vulcano-sedimentaria, todas ellas falladas y fracturadas. No hay una clara evidencia para la probable fuente de calor. En todo caso se trataría de un yacimiento de temperatura baja a intermedia, que sin embargo podría ser aprovechado para generar electricidad con plantas de ciclo binario, como ya lo hizo durante varios años la CFE (ver sección siguiente).

Estudios realizados

La CFE ha llevado a cabo estudios geológicos, geoquímicos y sondeos eléctricos verticales en la zona. Con base en estos resultados perforó un pozo de diámetro pequeño a 49 metros de profundidad, que produjo agua a 120-130°C, así como un pozo de diámetro mayor, a 300 metros de profundidad. Este pozo (denominado PL-2) produjo casi 10 litros por segundo de agua a 120°C, la cual fue utilizada por la CFE para alimentar una unidad turbogeneradora de ciclo binario de 300 kW de capacidad que se instaló para satisfacer las necesidades de energía del pueblo de Maguarichic, en aquel entonces aislado de la red de distribución. La planta operó entre 2001 y 2007, cuando finalmente el poblado quedó integrado a la red. Para un desarrollo mayor, hacen falta más estudios geofísicos.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **1 MW** con una desviación estándar de 0.5 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 0.2 y 1.7 MWe.

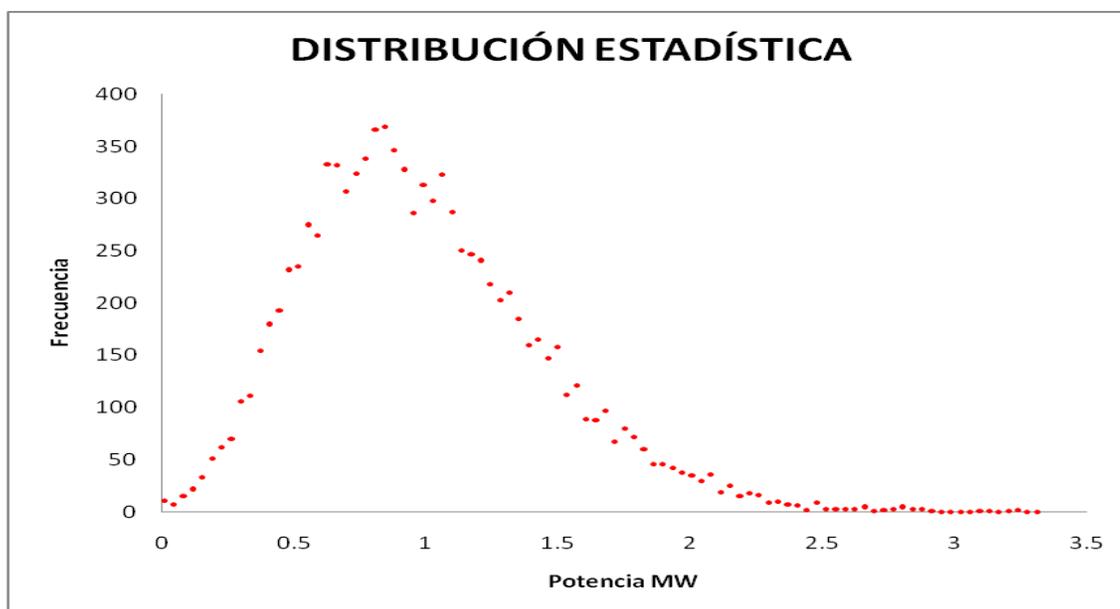


Figura 33. Resultados del modelo volumétrico para Maguarichic, Chihuahua

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Maguarichic, Chihuahua			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	4	4.5	5
Área (km ²)	1	2	3
Espesor (km)	0.6	0.8	1.2
Temperatura del yacimiento (°C)	150	155	160
Temperatura ambiente (°C)	1	19	38
Humedad relativa (%)	24%	48%	77%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	8%	15%	20%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2000	2300	2500
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.79	0.81	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	10%	15%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	2	8	10

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **1 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 34 y 35.

El área del probable yacimiento se estimó como un porcentaje de la superficie de las dos principales zonas de manifestaciones termales. El espesor se estimó con base en las secciones estructurales levantadas por la CFE. Se considera que la permeabilidad de las rocas del yacimiento sería elevada y que habría también la suficiente recarga profunda para el yacimiento, hasta la máxima potencia modelada.

Fuentes: Maciel (1985), Tello (1986), Mendoza et al. (2001).

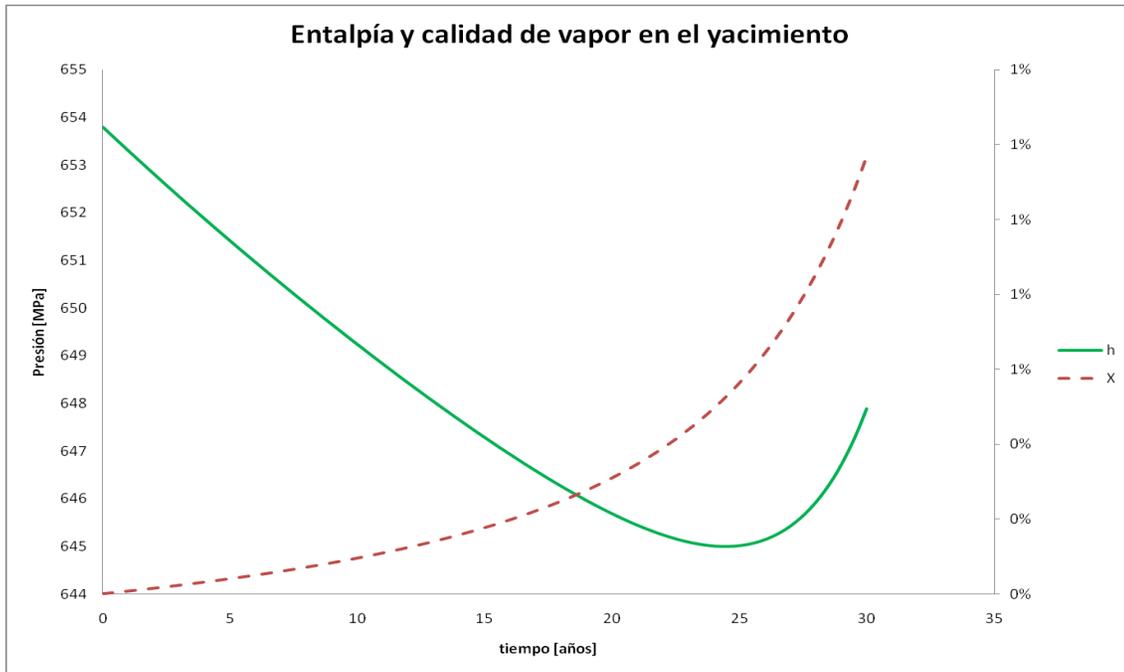


Figura 34. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Maguarichic.

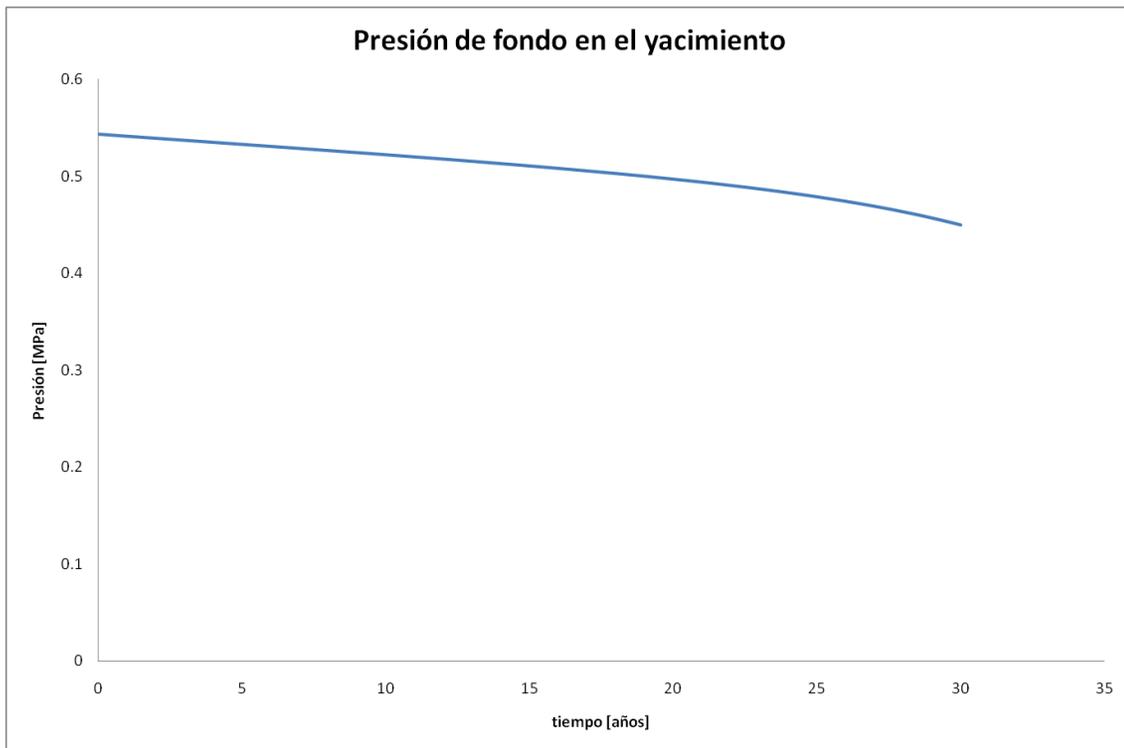


Figura 35. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Maguarichic.

ZONA GEOTÉRMICA DE PURUÁNDIRO, MICH.

Localización

La zona se encuentra en la parte norte del estado de Michoacán a unos 53 km al noroeste de la ciudad de Morelia, aproximadamente entre las coordenadas 20°05'25" de latitud norte y 101°29'45" de longitud oeste. La zona se ubica al occidente de la población de Puruándiro, pudiendo accederse a ella partiendo de Morelia por la carretera federal número 43 hacia Cuitzeo. Al norte de ese poblado se toma una carretera estatal que conduce a los balnearios de Huandacareo, Villa Morelos y Puruándiro. 15 km al occidente del proyecto se localiza una línea de transmisión de 115 kV. Desde el punto de vista fisiográfico, la zona está en la parte central de la Faja Volcánica Mexicana, cerca de sus límites con la Sierra Madre Occidental.

Descripción

Las rocas aflorantes incluyen ignimbritas, domos riolíticos, riolíticos y dacíticos, depósitos piroclásticos, sedimentos lacustres, andesitas y andesitas basálticas con edades del Mioceno al Cuaternario. En la zona hay numerosos volcanes monogenéticos cuaternarios, con edades menores a un millón de años, de composición andesítica y basáltica, emplazados a través de fallas y fracturas de dirección predominante noreste-suroeste a este-oeste. El régimen tectónico actualmente activo en la zona es de tipo distensivo y parece haber empezado hace medio millón de años. Aunque el sistema noreste-suroeste es más reciente, localmente el sistema este-oeste es el más importante. Las formas morfológicas principales son mesetas, domos, conos cineríticos, volcanes tipo escudo y estromboliano, estos últimos con domos de composición riolítica en sus cráteres. La actividad volcánica más reciente incluye flujos piroclásticos (ignimbritas) y domos dacíticos pequeños, de unos 0.5 millones de años de antigüedad, y conos cineríticos más recientes.

Afloran abundantes manantiales en un área de 0.7 km² (2.25 por 0.3 km) con temperaturas superficiales entre 30 y 84°C y un gasto conjunto entre 5 y 10 litros por segundo, asociados a estructuras de dirección este-oeste; hay diversos pozos para riego agrícola en la periferia con agua entre 40 y 60°C. Se identificaron también zonas de alteración hidrotermal (caolinización, silicificación) asociadas a algunos de los manantiales y hervideros. El agua de los manantiales es de tipo clorurado sódico con concentraciones de boro de hasta 3.3 ppm, cuyas temperaturas de fondo han sido calculadas entre 129 y 167°C mediante el geotermómetro de potasio-sodio.

El probable yacimiento geotérmico estaría contenido en una secuencia andesítico-basáltica que se estima subyace a la secuencia ignimbrítica superior de la Sierra Madre Occidental, que a su vez subyace a los productos volcánicos de la Faja Volcánica Mexicana. La fuente de calor podría ser la cámara magmática alimentadora de los domos dacíticos y/o de las ignimbritas, todos de edad cuaternaria que se encuentran en la zona.

Estudios realizados

La CFE ha llevado a cabo estudios geológicos y geoquímicos de detalle, así como estudios geofísicos de resistividad, gravimetría y magnetometría, que han permitido definir un

basamento resistivo entre 2 y 5 km de profundidad. Los mínimos resistivos resultaron muy someros y restringidos al área de manifestaciones termales. Por lo tanto, esta zona requeriría de estudios geofísicos de más detalle.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **10 MW** con una desviación estándar de 4 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 3 y 17 MWe.

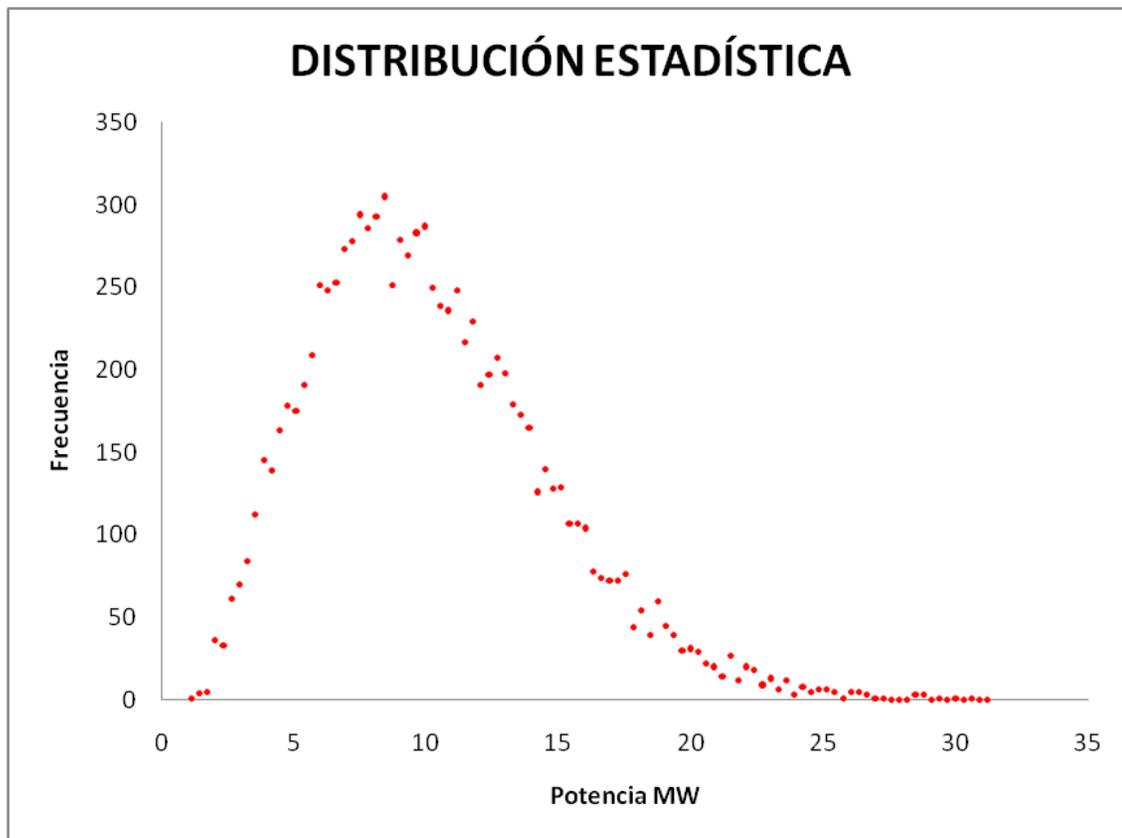


Figura 36. Resultados del modelo volumétrico para Puruándiro.

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Puruándiro, Michoacán			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	4	4.5	5
Área (km ²)	0.7	3	5
Espesor (km)	1.5	2.5	3
Temperatura del yacimiento (°C)	160	165	170
Temperatura ambiente (°C)	4	23.8	31
Humedad relativa (%)	47%	63%	90%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	4%	15%	20%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2400	2600	2800
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.79	0.84	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	15%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.2	2	2.2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **12 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 37 y 38.

El área máxima del probable yacimiento se estimó en el doble de la superficie ocupada por los manantiales termales, aunque puede ser mayor. El espesor se estimó con base en las conclusiones del estudio geológico de detalle practicado por la CFE. Se considera que la permeabilidad de las rocas del yacimiento sería de media a alta y que habría la suficiente recarga profunda para el yacimiento, hasta la máxima potencia modelada.

Fuentes: Canul y Ramírez (1985), Gutiérrez Negrín et al. (1989).

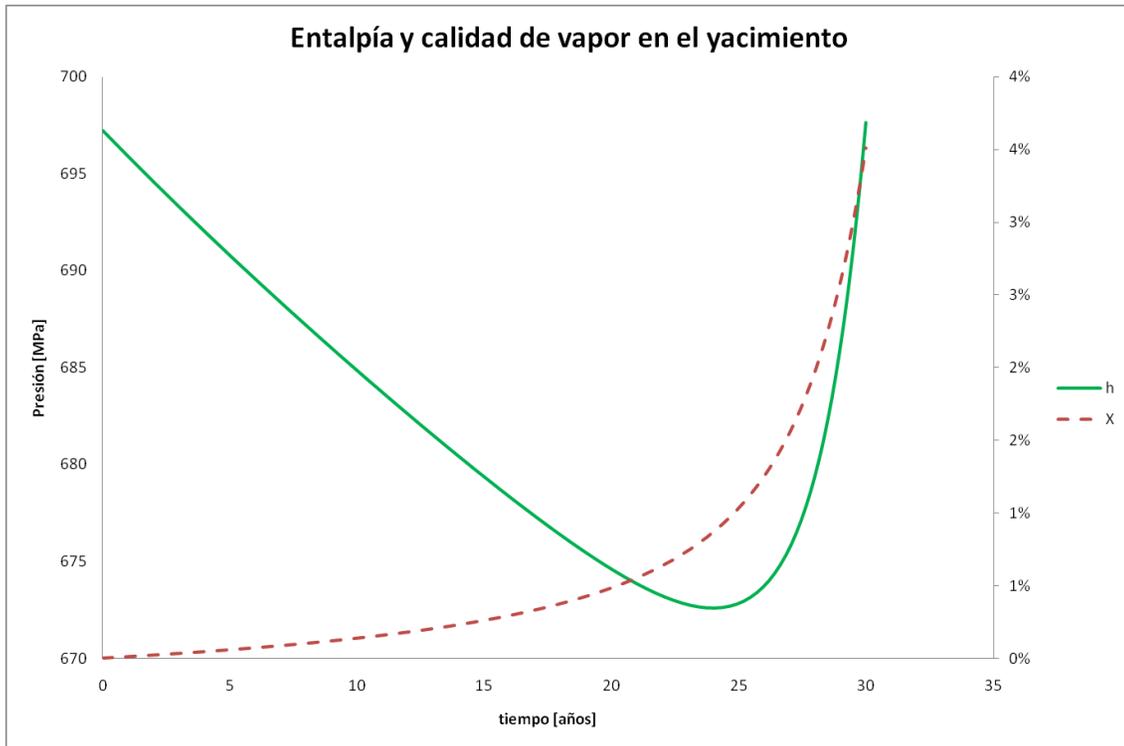


Figura 37. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Puruándiro

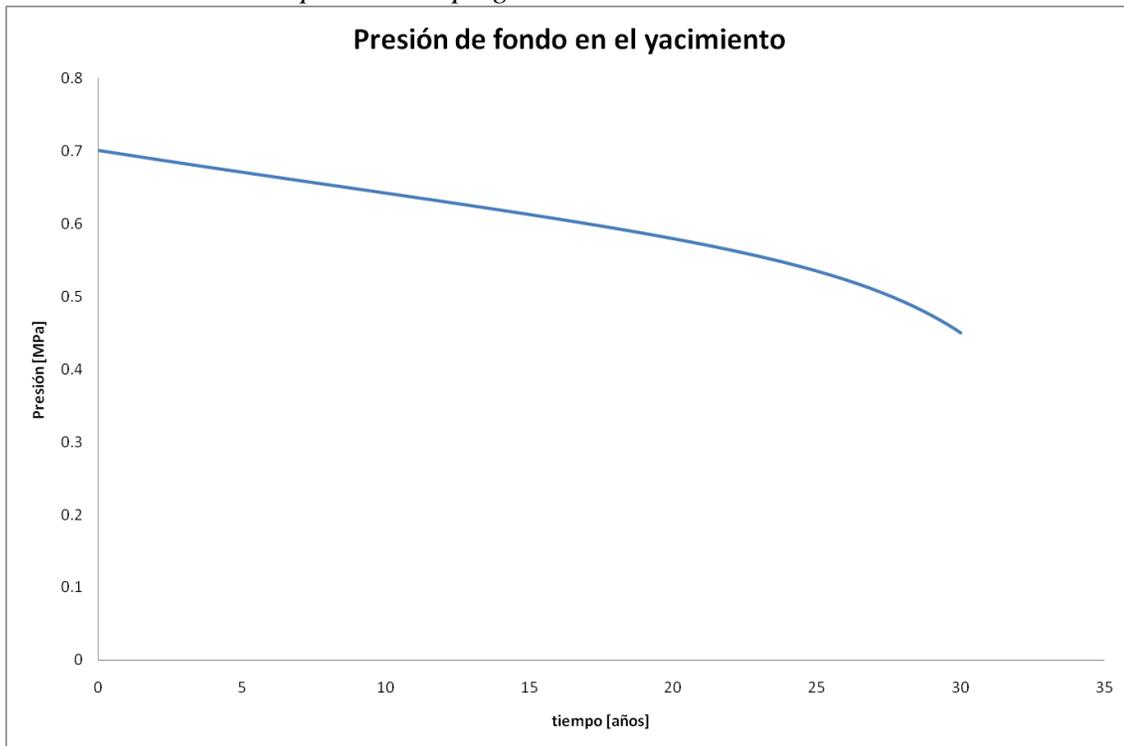


Figura 38. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Puruándiro.

ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN TACANÁ, CHIAPAS.

Localización

La zona se ubica en el extremo sureste de la república, 30 km al noroeste de la ciudad de Tapachula, Chis., pasando por la cima de este volcán el límite internacional con Guatemala. La zona geotérmica se ubica en el lado mexicano del volcán entre las rancherías El Águila y Agua Caliente, en las coordenadas aproximadas 15°07'05" de latitud norte y 92°08'47" de longitud oeste, y a una elevación de 3200 a 3600 msnm. Se accede a la zona partiendo de Tapachula por la carretera federal número 18, hacia la central hidroeléctrica José Cecilio del Valle, y se continúa por una carretera estatal hasta Unión Juárez, sitio más cercano a las manifestaciones termales. Fisiográficamente la zona está ubicada en la provincia del Macizo de Chiapas, que ocupa una franja paralela a la costa del Pacífico y que se extiende desde el Istmo de Tehuantepec hasta Guatemala.

Descripción

El Tacaná es un estratovolcán activo que forma parte del cinturón volcánico centroamericano y cuya formación se debe a la subducción de la Placa de Cocos debajo de la de Norteamérica. En el edificio volcánico pueden distinguirse cuatro etapas de erupciones andesíticas y tres de flujos piroclásticos, que produjeron dos calderas de 3 y 1.5 km de diámetro, respectivamente, y un cráter final en su cima de 0.5 km de diámetro, el cual está actualmente taponado por derrames de andesitas de hornblenda de textura porfídica. Todo el vulcanismo ocurrió en el Cuaternario, y la actividad más reciente está constituida por cuatro cráteres adventicios al oeste-suroeste de la cima, la cual se encuentra a 4110 msnm, y donde se ha reportado actividad fumarólica y erupciones de ceniza en 1950. El volcán se eleva sobre un basamento local compuesto por rocas volcánicas terciarias (andesitas y tobas), de entre 600 a 1300 m de espesor, que a su vez sobreyacen a rocas intrusivas terciarias (dioritas, tonalitas y granodioritas) y paleozoicas (granitos y granodioritas). Las rocas intrusivas representan el basamento regional y se infieren a unos 2200 m de profundidad. Las estructuras se agrupan en tres sistemas de dirección noreste-suroeste, noroeste-sureste y este-oeste, siendo el primero el más importante.

La actividad termal está representada por fumarolas y manantiales. Las fumarolas se encuentran en el flanco oeste-suroeste entre los 3200 y 3600 msnm de elevación, asociadas al borde de la caldera exterior. Las temperaturas superficiales están entre 82 y 94°C y el geotermómetro de D'Amore-Panichi calcula temperaturas de fondo entre 212 y 260°C. Los manantiales termales se localizan sobre el flanco noroeste del volcán, entre los 1500 y 2100 msnm, con temperaturas de 40 a 55°C y aguas de tipo mixto a sulfatado sódico, con temperaturas de fondo entre 250 y 290°C de acuerdo al geotermómetro de sodio-potasio.

El probable yacimiento geotérmico estaría alojado principalmente en las rocas andesíticas terciarias y parcialmente en las propias andesitas cuaternarias del volcán y en las rocas intrusivas basamentales. La fuente de calor sería la cámara magmática del propio volcán. El sistema geotérmico sería recargado por la intensa precipitación de la zona (entre 4500 y 5000 mm anuales) a través de abundantes fracturas.

Estudios realizados

La CFE realizó en el pasado estudios geológicos y geoquímicos de detalle, pero no se han realizado estudios geofísicos. Por lo tanto, sería recomendable actualizar la geología y la geoquímica y llevar a cabo una campaña de estudios geofísicos incluyendo sondeos magnetotelúricos, electromagnéticos y gravimétricos para definir el comportamiento estructural del basamento.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **60 MW** con una desviación estándar de 23 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 21 y 99 MWe.

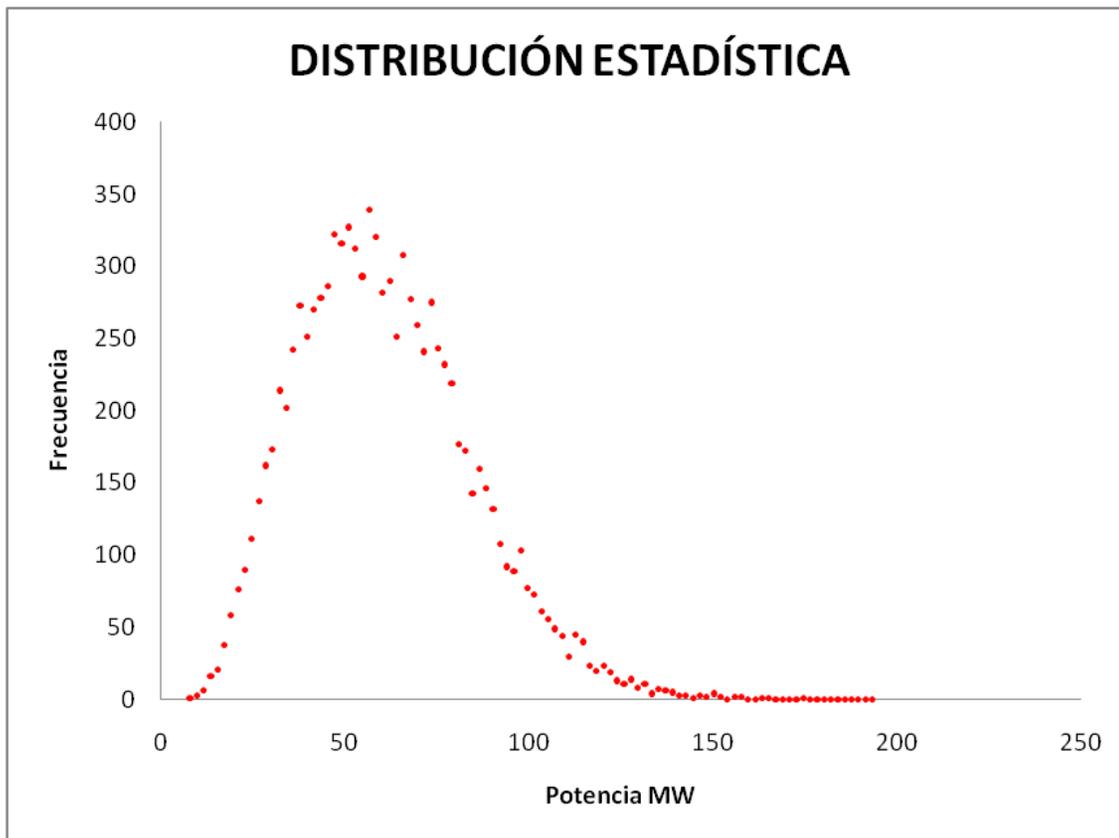


Figura 39. Resultados del modelo volumétrico para Tacaná.

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Tacaná, Chiapas			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	1.8	3.5	7
Espesor (km)	1.2	2	2.2
Temperatura del yacimiento (°C)	210	250	290
Temperatura ambiente (°C)	15	25	35
Humedad relativa (%)	70%	80%	90%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	4%	15%	20%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2300	2600	2900
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.8	0.9	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	15%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (mildarcy, mD)	0.2	2	2.2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **52 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 40 y 41.

El área mínima y máxima del probable yacimiento se estimó de acuerdo al diámetro de sus dos calderas, pero podría ser superior considerando la magnitud del volcán. El espesor se estimó con base en la profundidad inferida del basamento intrusivo y el espesor de las rocas volcánicas cuaternarias. Se considera que la permeabilidad de las rocas del yacimiento sería bastante alta, y que la recarga profunda sería más que suficiente para compensar el volumen de fluidos geotérmicos a extraer para la máxima potencia modelada.

Fuente: De la Cruz y Hernández (1986).

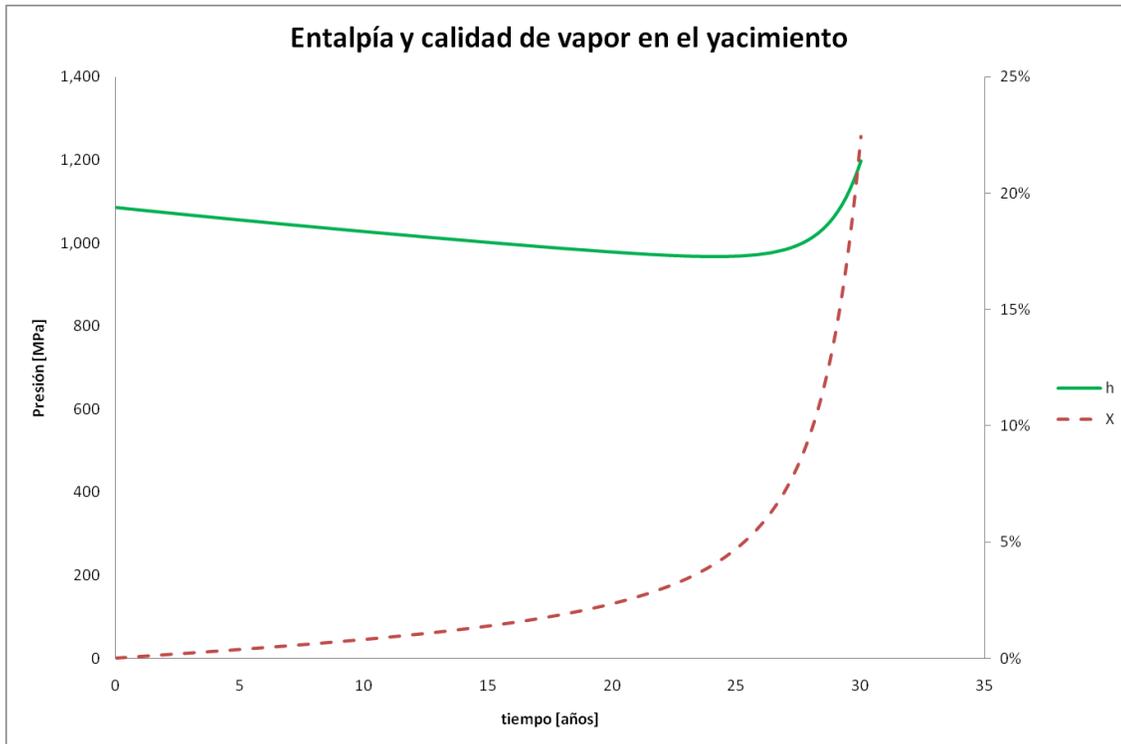


Figura 40. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico del Volcán Tacaná

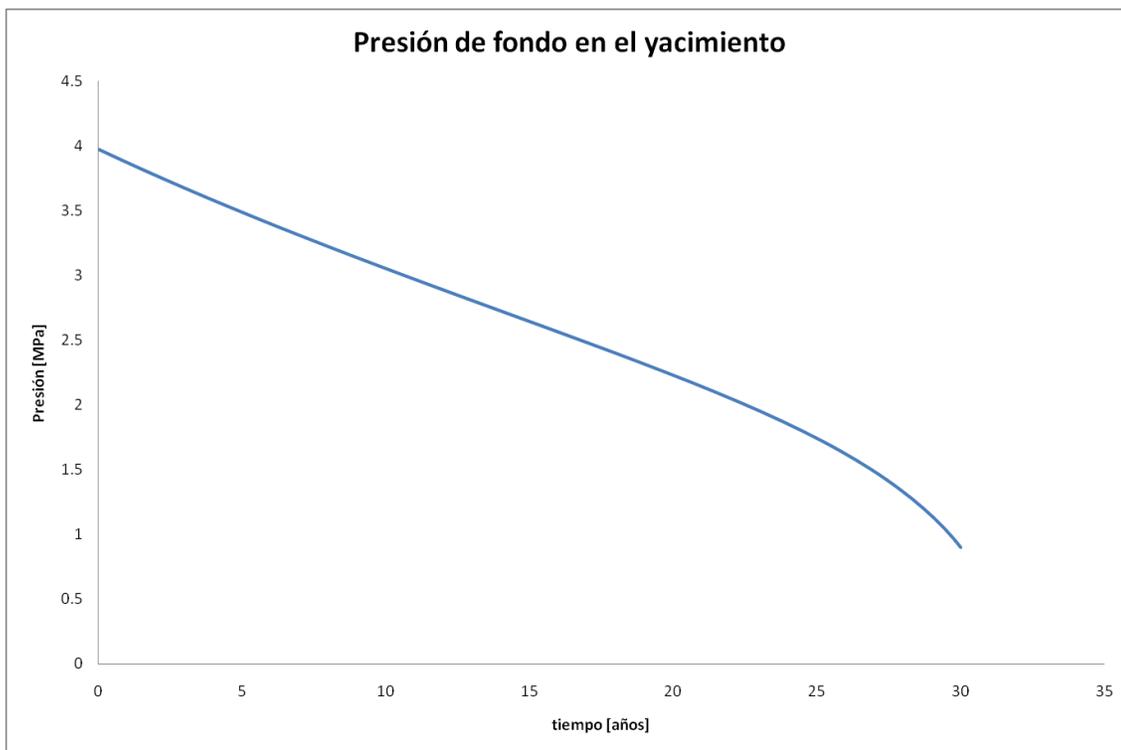


Figura 41. Evolución de la presión para el campo geotérmico del Volcán Tacaná.

ZONA GEOTÉRMICA DE EL ORITO-LOS BORBOLLONES, JAL.

Localización

Se ubica en la porción centro-norte del estado de Jalisco, a unos 5 km al noroeste de Tequila, en las coordenadas aproximadas $20^{\circ}58'$ de latitud norte y $101^{\circ}52'11''$ de longitud oeste, y a una elevación de 600 msnm, sobre el cauce del Río Grande de Santiago. Se puede acceder a través de la carretera federal número 15, y a la altura del poblado de Santa Teresa tomar una terracería hacia las rancherías de El Colomo y El Orito; a partir de esta última se puede bajar a pie a la zona geotérmica. Desde el punto de fisiográfico, la zona está en el límite entre las provincias de la Faja Volcánica Mexicana y la Sierra Madre Occidental, que en esta zona lo representa el río mencionado.

Descripción

Las geoformas identificadas en el área incluyen domos ácidos, mesas y derrames fluidales de riolitas y mesetas basálticas y andesíticas. Las rocas aflorantes son andesitas, riolitas, ignimbritas, basaltos, tobas y escoria volcánica con edades que van del Oligoceno-Mioceno al Cuaternario, pudiendo diferenciarse entre las rocas oligo-miocénicas pertenecientes a la Sierra Madre Occidental, con espesores mayores de 1000 metros, y las formadas por el vulcanismo plio-cuaternario de la Faja Volcánica Mexicana. Entre estas últimas se encuentran domos riolíticos cuaternarios que aunque no parecen estar directamente relacionados con el termalismo evidencian actividad volcánica reciente. El basamento está constituido por granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas que afloran de manera aislada sobre el cauce del Río Grande de Santiago, con edades de 18 a 26 millones de años.

Hay tres sistemas estructurales de dirección noroeste-sureste, noreste-sureste y norte-sur que afectan a toda la columna litológica, siendo el segundo el más reciente. En la zona se identificaron 23 manifestaciones termales, 15 de las cuales se agrupan en el área conocida como Los Borbollones, que es la más importante. Esta presenta manantiales, hervideros, suelos calientes y tres chorros de agua a presión, con temperaturas superficiales entre 49 y 97°C , aflorando en una superficie de 2.5 km^2 asociada con la intersección de los tres sistemas estructurales mencionados. Se conoce también una zona de alteración hidrotermal (caolinización y silicificación) de un kilómetro cuadrado. El agua de los manantiales de Los Borbollones es sulfatada sódica con concentraciones de boro de hasta 7.8 ppm y temperaturas de fondo calculadas entre 189 y 196°C con el geotermómetro de potasio-sodio y de 148°C con el geotermómetro de gases de D'Amore-Panichi.

El probable sistema geotérmico en el subsuelo de la zona podría estar contenido en la secuencia andesítica oligo-miocénica que constituye el miembro inferior de la Sierra Madre Occidental y probablemente también en la secuencia ignimbrítica superior. La fuente de calor sería una cámara volcánica semejante a la que produjo los domos riolíticos cuaternarios de la zona. Las rocas del subsuelo parecen estar fuertemente fracturadas por las estructuras.

Estudios realizados

La CFE llevó a cabo estudios geológicos y geoquímicos de detalle en la década de los ochenta, pero haría falta actualizarlos y complementarlos con estudios estructurales, dataciones radiométricas, y estudios geofísicos de detalle (sondeos magnetotelúricos y electromagnéticos, y gravimetría).

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **11 MW** con una desviación estándar de 6 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 1 y 21 MWe.

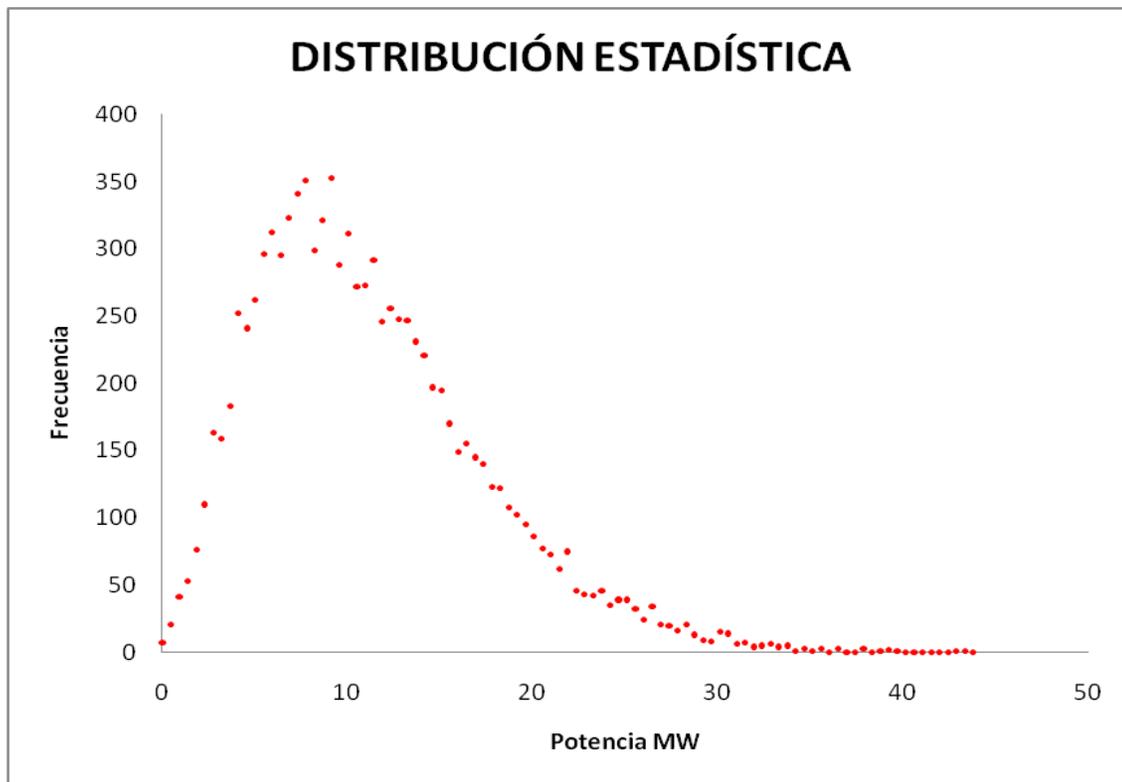


Figura 42. Resultados del modelo volumétrico para Orito-Los Borbollones.

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Orito-Los Borbollones, Jalisco			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	6	7
Área (km ²)	1	2.5	5
Espesor (km)	1.5	2	2.5
Temperatura del yacimiento (°C)	160	180	200
Temperatura ambiente (°C)	1	20	35
Humedad relativa (%)	29%	53%	78%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	4%	12%	15%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2600	2700	2900
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.8	1	1.2
Factor de recuperación Rg (%)	5%	13%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.2	2	2.2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **9 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 43 y 44.

El área mínima y máxima del probable yacimiento se estimó de acuerdo a la extensión de la zona de alteración hidrotermal y a la de las manifestaciones en la zona de Los Borbollones, respectivamente. El espesor se estimó con base en el espesor estimado para el paquete de la Sierra Madre Occidental. Se considera que la permeabilidad de las rocas del yacimiento sería elevada, y que no habría problema de recarga profunda hasta la máxima potencia modelada.

Fuentes: Herrera y Ramírez (1986), Gutiérrez Negrín et al. (1989)

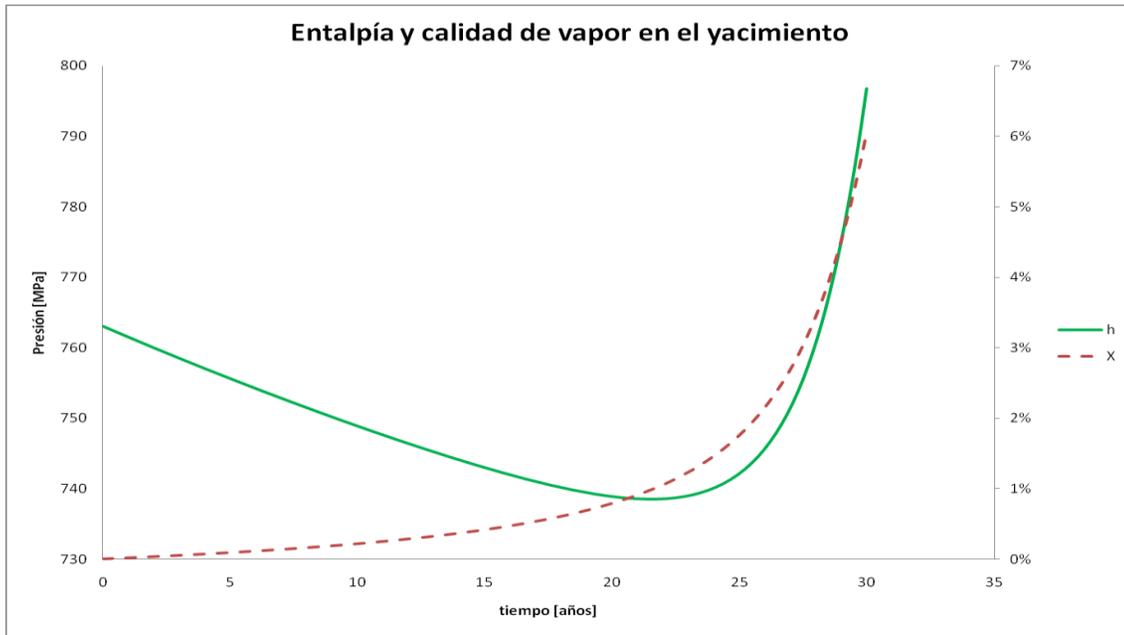


Figura 43. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Orito – Los Borbollones.

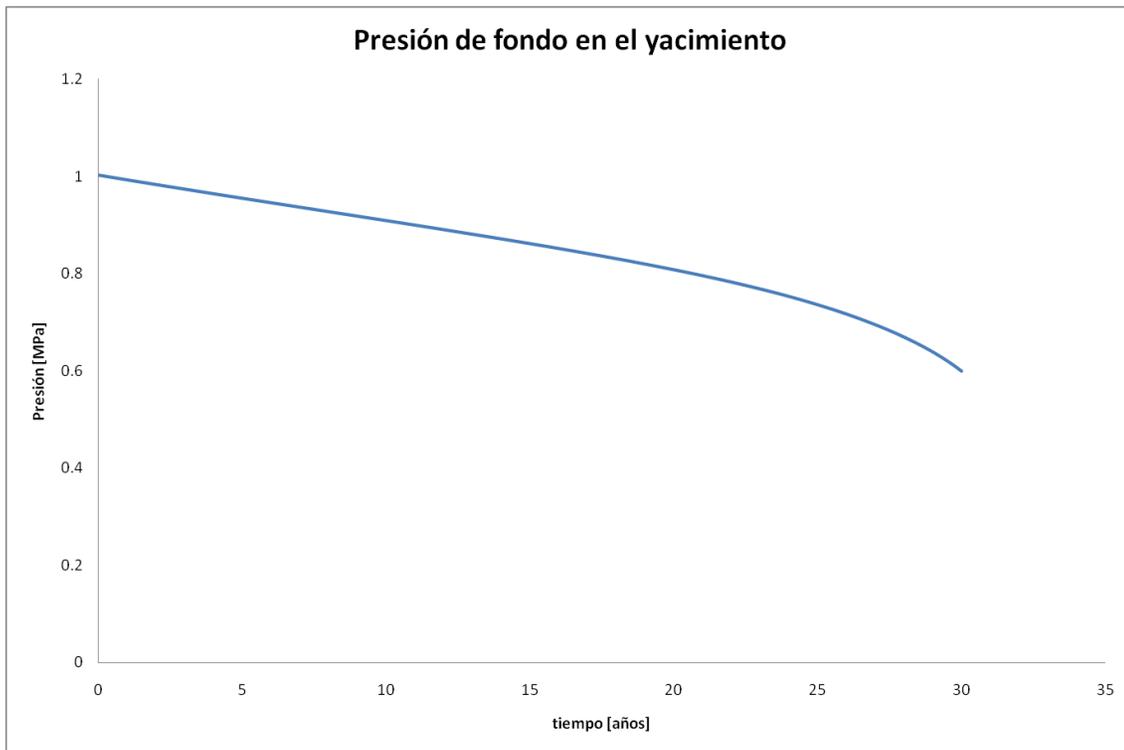


Figura 44. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Orito – Los Borbollones.

ZONA GEOTÉRMICA DE SANTA CRUZ DE ATISTIQUE, JAL.

Localización

La zona se ubica en la parte centro-norte del estado de Jalisco, prácticamente en el límite con Zacatecas, a unos 40 km en línea recta al norte de Guadalajara, en las coordenadas aproximadas 21°06'29" de latitud norte y 103°26'15" de longitud oeste, a una elevación aproximada de 1000 msnm. El acceso es a través de la carretera estatal Guadalajara-Tesistán, después por la carretera estatal a San Cristóbal de la Barranca y finalmente por una terracería que conduce a la ranchería de Santa Cruz de Atistique. El acceso hasta la zona de manifestaciones es a pie. Fisiográficamente, la zona está en los límites entre la Faja Volcánica Mexicana y la Sierra Madre Occidental.

Descripción

Las rocas aflorantes son andesitas y tobas de edad Oligoceno-Mioceno que corresponden a la secuencia basamental de la Sierra Madre Occidental, y a riolitas e ignimbritas del miembro superior de la misma sierra y de edad Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano. El vulcanismo de la Faja Volcánica Mexicana está representado por derrames andesíticos y basálticos del Plioceno. No hay evidencias de vulcanismo cuaternario en la zona.

El termalismo parece asociarse con el cruce de dos sistemas estructurales de dirección noroeste-sureste y noreste-suroeste a norte-sur, que es el más reciente. A este último pertenece la Falla Santa Cruz, a lo largo de la cual aparecen las manifestaciones termales. Estas ocurren en el cauce del Río Patitos que corre por una fractura de dirección norte-sur y que es tributario del Río Grande de Santiago. El Río Patitos sufre un brusco cambio de dirección en la intersección con la Falla Santa Cruz, presentándose ahí las principales manifestaciones termales. Estas incluyen manantiales y chorros de agua a presión con temperaturas superficiales desde 42 a 97°C, suelos vaporizantes y un área de alteración hidrotermal (silicificación y caolinización) en una superficie de 4,500 m² que se extiende a lo largo de la Falla Santa Cruz. El agua de los chorros es de tipo sulfatada sódica y presenta concentraciones de boro de hasta 4.8 ppm. Los gases desprendidos contienen H₂S y H, indicativos de alta temperatura a profundidad. El geotermómetro de potasio-sodio calcula temperaturas de fondo máximas de 230°C.

Se considera probable la existencia de un yacimiento geotérmico a profundidad, que estaría contenido en las secuencias andesíticas y tobáceas del miembro inferior de la Sierra Madre Occidental, alimentado por una probable cámara magmática antigua que no ha producido actividad volcánica en los últimos dos millones de años.

Estudios realizados

La CFE llevó a cabo únicamente estudios geológicos y geoquímicos de semi-detalle en la década de los ochenta. Por ello, es necesario realizar estudios geológicos y geoquímicos complementarios, en particular levantamientos estructurales y micro-estructurales, fechamiento radiométrico a muestras de rocas, análisis isotópicos y re-muestreo de gases.

Igualmente, es necesario llevar a cabo estudios geofísicos (sondeos magnetotelúricos y electromagnéticos).

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **12 MW** con una desviación estándar de 6 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 2 y 22 MWe.

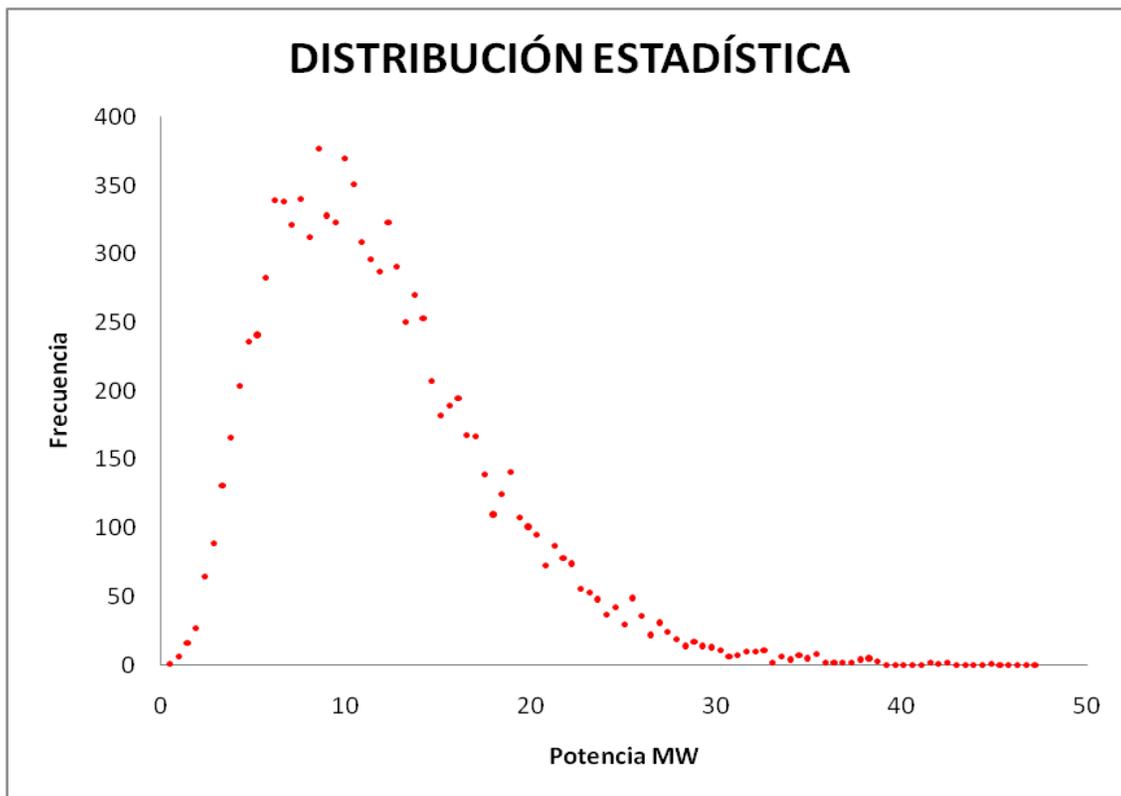


Figura 45. Resultados del modelo volumétrico para Santa Cruz Atistique.

Debido a la ausencia de estudios geofísicos, los parámetros utilizados en el modelo deben ser tomados con mayor reserva que en otras zonas. Estos parámetros fueron los siguientes:

Santa Cruz Atistique, Jalisco			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	6	7
Área (km ²)	1	3	6
Espesor (km)	1.3	1.7	2.2
Temperatura del yacimiento (°C)	165	185	200
Temperatura ambiente (°C)	1	22	35
Humedad relativa (%)	40%	67%	96%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	4%	15%	20%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2200	2500	2800
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.8	0.85	1.1
Factor de recuperación R _g (%)	5%	13%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (mildarcy, mD)	0.2	1	2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **13 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 46 y 47.

El área mínima y máxima del probable yacimiento se estimó de acuerdo a la extensión de la zona de manifestaciones termales. El espesor se estimó con base en el espesor calculado para ambos paquetes de la Sierra Madre Occidental. Se considera que la permeabilidad de las rocas del yacimiento sería elevada, y que no habría problema de recarga profunda hasta la máxima potencia modelada.

Fuentes: Gutiérrez Negrín et al. (1989)

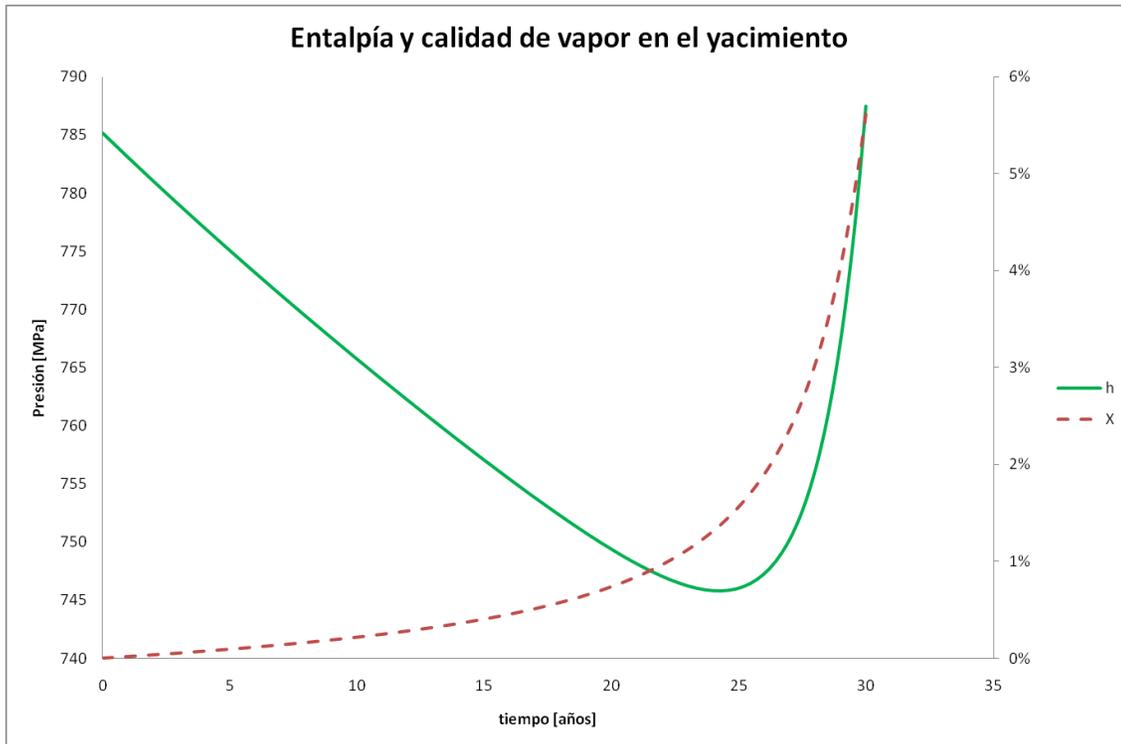


Figura 46. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Santa Cruz Atistique.

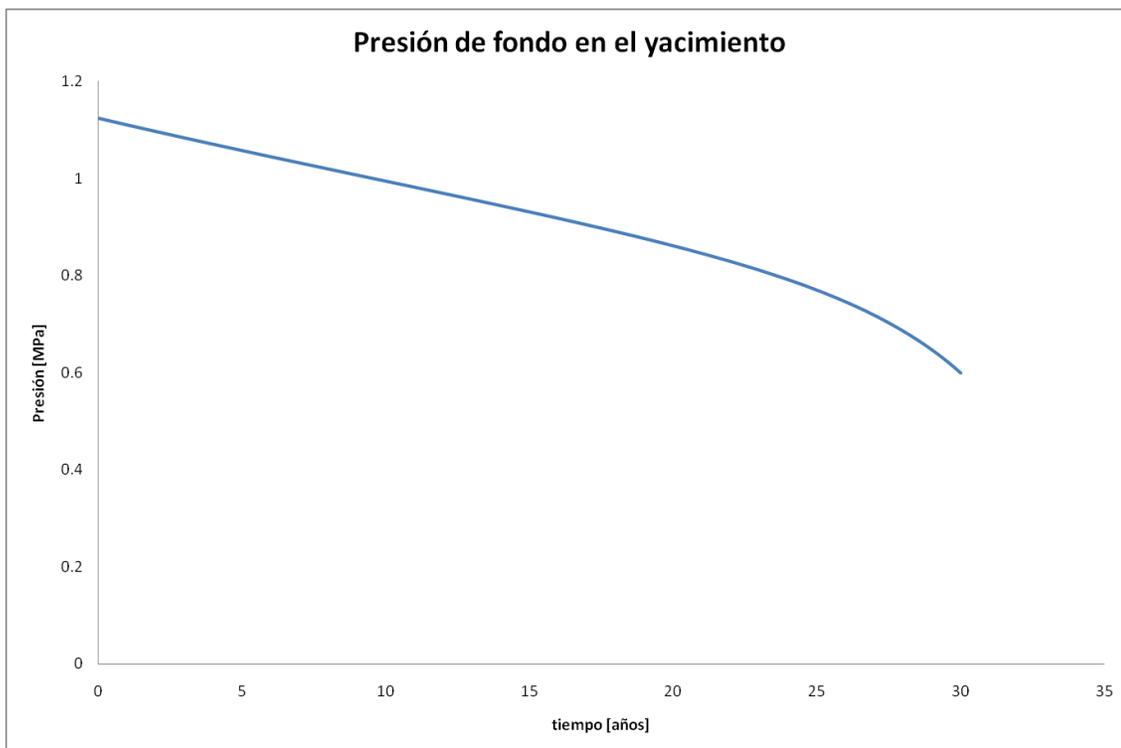
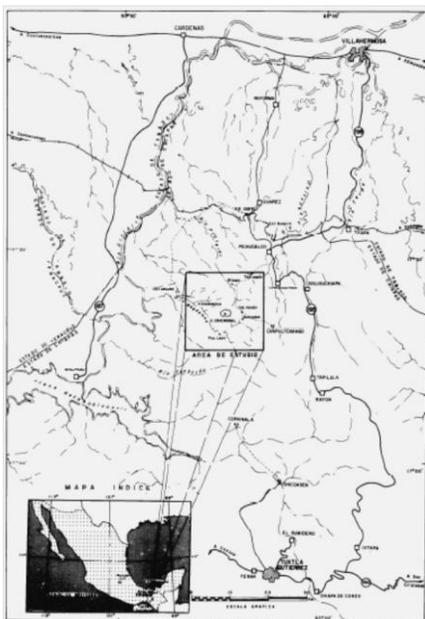


Figura 47. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Santa Cruz Atistique.

ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN CHICHONAL, CHIAPAS.



Localización

La zona se localiza en la parte noroeste del estado de Chiapas, muy cerca del punto en que confluyen los límites entre los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas, aproximadamente en las coordenadas 17°21'11" de latitud norte y 93°15'10" de longitud oeste. Dista unos 60 km de la capital, Tuxtla Gutiérrez, y 20 km, hacia el suroeste, de Pichucalco, que es la población más cercana. La central hidroeléctrica de Chicoasén se encuentra a unos 45 km al sureste. Puede accederse a la zona por la carretera federal 195 que va de Tuxtla Gutiérrez a Villahermosa y pasa por Pichucalco; de esta población hay caminos de terracería hasta las poblaciones de Colonia El Volcán y Chapultenango, ubicadas en las faldas del complejo volcánico. Desde el punto de vista fisiográfico, la zona está ubicada en la provincia del Altiplano de Chiapas-Guatemala, dentro de la subprovincia de Sierras Plegadas.

Descripción

El Chichonal es un estratovolcán que empezó a formarse a principios del Cuaternario en una zona de fuerte actividad tectónica debido a su cercanía a la confluencia de las placas tectónicas de Norteamérica, Cocos y El Caribe. Esta zona de debilidad cortical se ha formado por la intersección de dos sistemas de fallas, uno más antiguo de dirección casi este-oeste, y otro más reciente de dirección casi norte-sur. El volcán ha presentado varios eventos de tipo explosivo a lo largo de su historia, el más reciente de los cuales ocurrió en dos fases sucesivas, una entre el 28 y 29 de marzo y otra el 3-4 de abril de 1982. En ambos casos se trató de erupciones de tipo pliniano que emitieron productos piroclásticos y gases, sin lava, dando lugar a depósitos de avalancha y de caída aérea de composición andesítica.

Las manifestaciones termales son fumarolas ubicadas en el cráter principal del volcán y manantiales termales en sus flancos. Hasta antes de la última erupción las fumarolas fluían entre las paredes del cráter y el domo que entonces lo taponaba (y que fue destruido después, durante la erupción de 1982), tenían temperaturas superficiales entre 93 y 98°C, desprendían H₂S y había depósitos de azufre nativo. Los manantiales termales actuales se presentan en cinco grupos sobre los flancos del volcán, a una distancia de entre 2 y 3 km en línea recta de la cima. Se encuentran en las partes superiores de los cañones donde las aguas calientes se mezclan con agua meteórica superficial y forman arroyos que fluyen hacia el Río Magdalena. Las temperaturas superficiales van de los 50 a los 74°C. Cuatro de esos grupos de manantiales presentan aguas de tipo clorurado sódico a sulfatado cálcico y pH neutro. Las aguas del otro grupo son cloruradas sódicas y pH ácido (2.2 a 2.7), con alta salinidad (más de 15,000 ppm). Las temperaturas de fondo calculadas por la CFE antes de la erupción de 1982 y aplicando el geotermómetro de potasio-sodio iban de los 217 a los 293°C. La geotermometría actual indica

temperaturas de fondo ligeramente menores, entre 200 y 250°C. La descarga total de cloro de origen hidrotermal del conjunto de manantiales termales ha sido estimada en 468 gramos por segundo, correspondiendo a una descarga másica de 234 kg/s de agua caliente con un promedio de 2000 ppm. Una estimación reciente concluye que el calor total descargado por las aguas termales puede estar entre 175 y 210 MW térmicos.

El probable yacimiento geotérmico estaría contenido en rocas sedimentarias cretácicas que constituyen el basamento del volcán, compuestas por calizas dolomíticas con probables cavernas de disolución, intercaladas en sus partes inferiores con depósitos evaporíticos (anhidritas). Estas secuencias son sobreyacidas probablemente por lutitas y areniscas compactas de menor permeabilidad que podrían actuar como rocas sello del yacimiento. La fuente de calor es la cámara magmática alimentadora del volcán. Para un probable desarrollo geotérmico de esta zona deberá evaluarse con cuidado la probabilidad de un futuro evento eruptivo explosivo.

Estudios realizados

La CFE ha llevado a cabo un par de estudios geológicos de detalle en la zona, uno realizado unos meses antes de la última erupción, y otro en 2010. Aunque el volcán ha sido ampliamente estudiado por investigadores nacionales y extranjeros, es preciso realizar estudios vulcanológicos y geofísicos de detalle antes de localizar algún pozo exploratorio.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **46 MW** con una desviación estándar de 23 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 9 y 84 MWe.

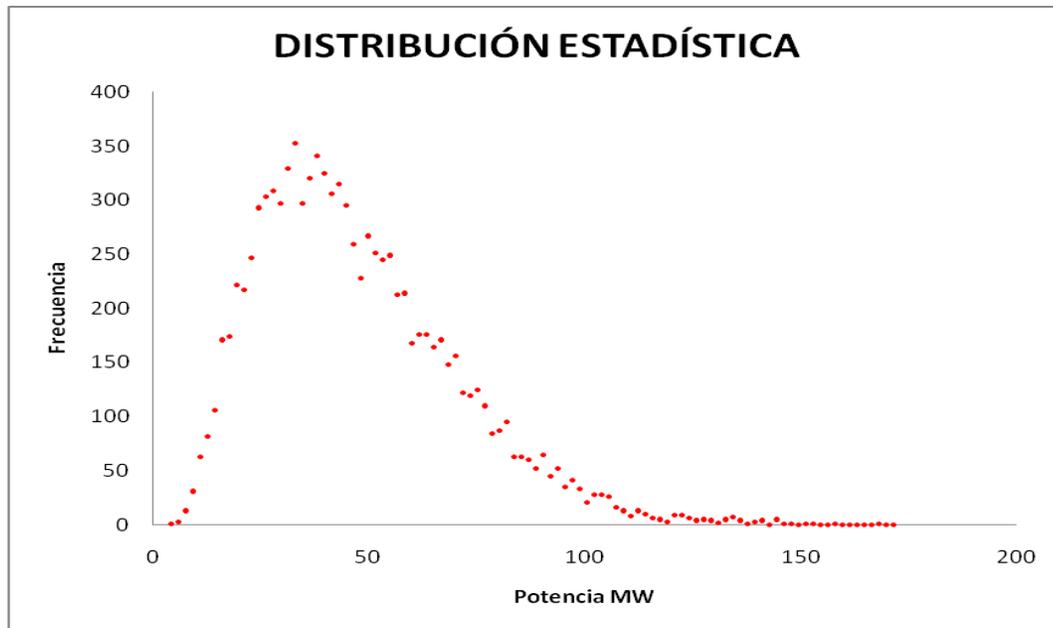


Figura 48. Resultados del modelo volumétrico para el Volcán Chichonal.

Esta zona también carece de estudios geofísicos, por lo que los parámetros utilizados en el modelo deben ser tomados con la debida reserva. Estos parámetros fueron los siguientes:

Volcán Chichonal, Chiapas			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	1	3	5
Espesor (km)	1	2	2.5
Temperatura del yacimiento (°C)	200	250	290
Temperatura ambiente (°C)	28	29	30
Humedad relativa (%)	24%	48%	77%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	4%	15%	18%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2500	2600	2700
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.8	0.95	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	15%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (mildarcy, mD)	0.2	2	4

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **45 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 49 y 50.

El área máxima del probable yacimiento se estimó considerando el 10% de la extensión superficial que alcanzaron los depósitos de la última erupción (que tuvo un diámetro de 25 km). de acuerdo a la extensión de la zona de manifestaciones termales. El espesor se estimó con base en el espesor estimado de las secuencias sedimentarias del basamento del volcán. Se considera que la permeabilidad de las rocas del yacimiento sería elevada debido a probables procesos de karsticidad encontrados en pozos petroleros de la zona, y que no habría problema de recarga profunda hasta la máxima potencia modelada.

Fuentes: Canul Dzul y Rocha López (1981), Sánchez Rubio (1985), Taran y Peiffera (2009)

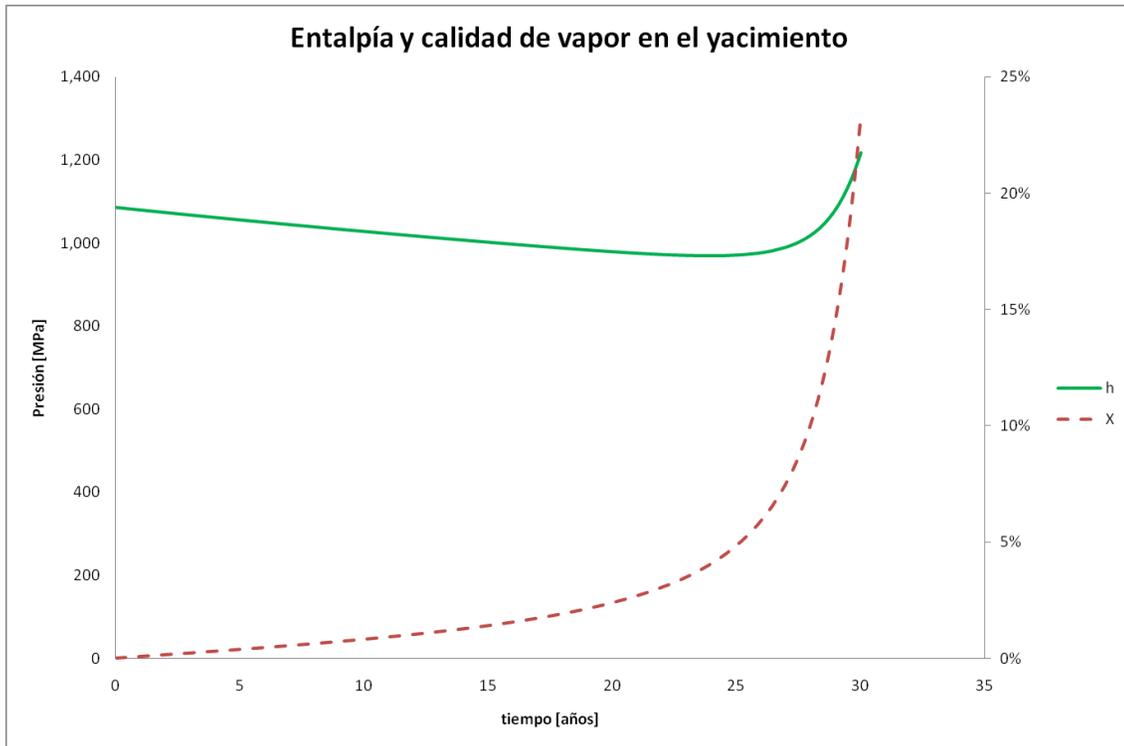


Figura 49. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Chichonal.

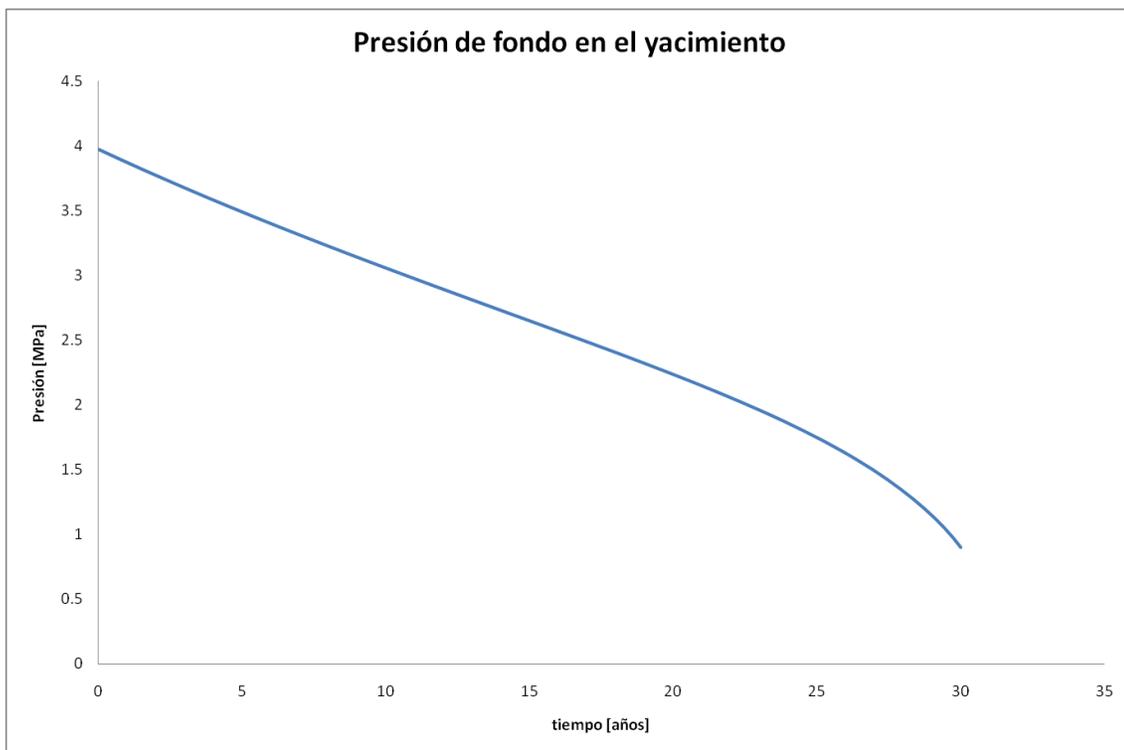
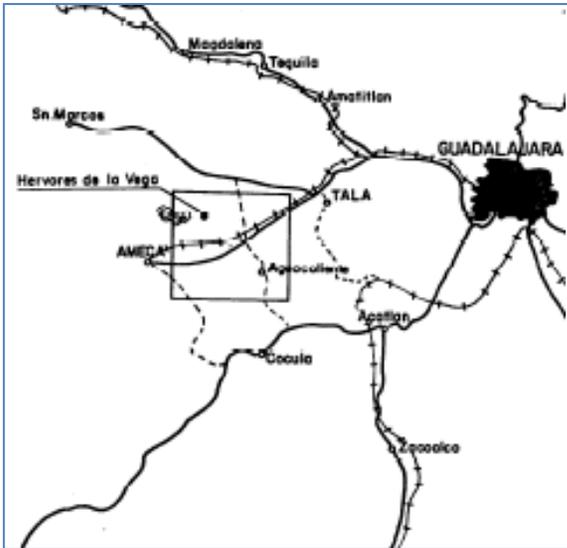


Figura 50. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Chichonal.

ZONA GEOTÉRMICA DE HERVORES DE LA VEGA, JAL.

Localización



Se ubica en la porción central del estado de Jalisco, a unos 50 km al oeste de la capital, Guadalajara, en las coordenadas geográficas aproximadas 20°36'22" de latitud norte y 103°53'04" de longitud oeste, y a unos 1300 msnm. El acceso puede efectuarse saliendo de Guadalajara hacia Ameca por la carretera federal número 70. En el kilómetro 41 hay una desviación que conduce la ranchería de La Vega, de donde sale un camino de terracería con un recorrido de unos 5 km que llega a la ranchería San Antonio Puerto de la Vega y a la zona de manifestaciones. Desde el punto de vista fisiográfico la zona pertenece a la provincia de la Faja Volcánica Mexicana, muy

cerca de los límites con la de la Sierra Madre Occidental, y es parte de la porción sur del Bloque Jalisco.

Descripción

La zona termal se ubica en la porción meridional del graben regional Tepic-Zacoalco, prácticamente sobre su borde occidental, y por tanto está sujeta a los esfuerzos que ocurren actualmente en el mismo y que en la zona han provocado estructuras de dirección noroeste-sureste, así como otras de dirección casi este-oeste. No existe actividad volcánica dentro de la zona interés. La más cercana corresponde a las Ignimbritas Acatlán, de edad cuaternaria, que afloran fuera de la zona, hacia el sureste de la misma.

La principal zona de manantiales, con ocho de ellos, se ubica en el flanco oriental de la Sierra de la Laja, la cual está constituida por un basamento granítico del Cretácico Tardío cubierto por una secuencia sedimentaria de areniscas, limolitas y lutitas, que a su vez es cubierta por andesitas de probable edad oligo-miocénica. Esta secuencia es intrusada por granodioritas y cuarzomonzonitas de probable edad Terciario Tardío. La sierra es parte de una elevación tectónica local (horst) de dirección este-oeste. Los manantiales afloran en un conglomerado reciente, con depósitos de travertino a su alrededor. Presentan temperaturas superficiales de 82 a 97°C, con agua de tipo clorurado-sulfatado-sódico, pH ligeramente alcalino, desprendimiento de gases y concentraciones de boro de hasta 30 ppm. El geotermómetro de sodio-potasio-calcio indica temperaturas de fondo entre 160 y 212°C. Los gases son CO₂, H₂S y N₂, característicos de sistemas geotérmicos y se reporta un temperatura de 244°C obtenida con el geotermómetro de D'Amore-Panichi, aunque el dato no parece ser muy confiable. Existen también otros manantiales al sureste, en los poblados de Agua Caliente y Buenavista, que podrían ser una descarga de los de Hervores de la Vega.

Desde el punto de vista geohidrológico, la zona pertenece a la cuenca del Río Ameca, y se ubica en la confluencia de los valles de Etzatlán y Río Salado.

El probable yacimiento geotérmico podría estar contenido en las andesitas del Oligoceno-Mioceno, que se observan fuertemente fracturadas en superficie, y/o en las areniscas y rocas intrusivas que las subyacen. No existe una probable fuente de calor, por lo que podría tratarse de un sistema acuífero profundo, con aguas meteóricas calentadas debido a su circulación profunda. Sin embargo, las características químicas del agua sugieren una probable fuente magmática, lo que aún debe dilucidarse.

Estudios realizados

La CFE realizó en el pasado estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos, incluyendo estos últimos levantamientos gravimétricos, magnetométricos y 94 sondeos eléctricos verticales con arreglo Schlumberger. También perforó 83 barrenos para medir temperaturas, aunque no hay datos de su profundidad. Tomando en cuenta la antigüedad de estos estudios, es recomendable actualizarlos y complementarlos.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **45 MW** con una desviación estándar de 15 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 20 y 71 MWe.

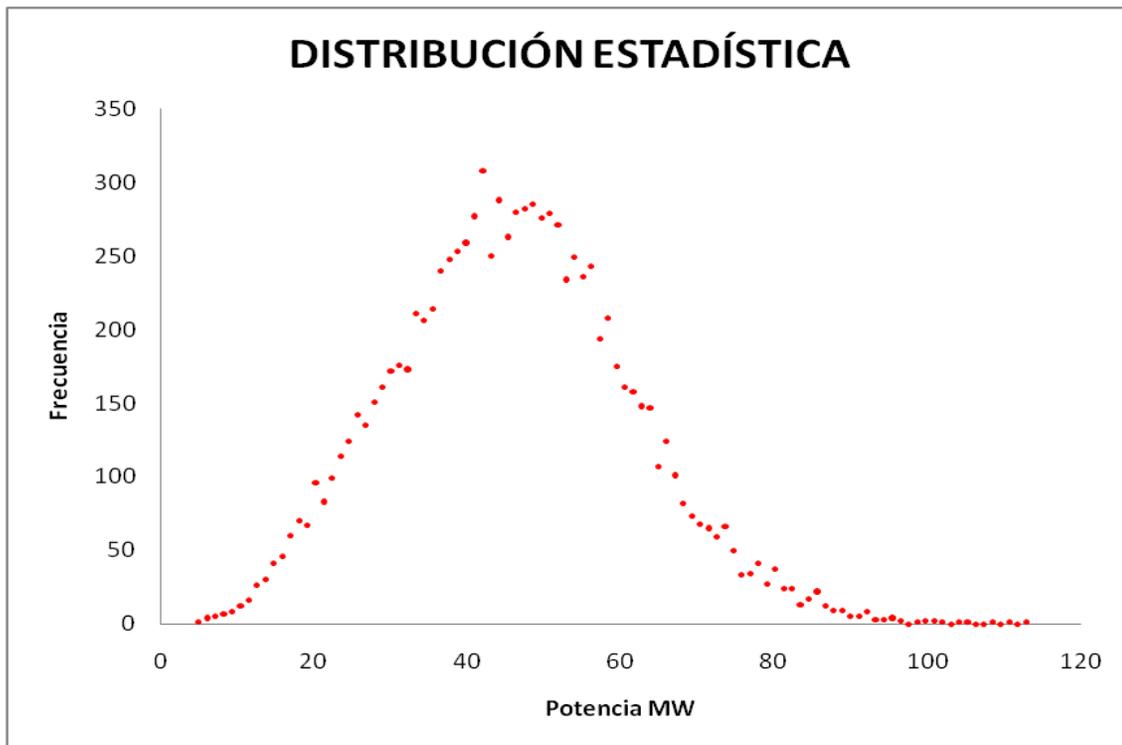


Figura 51. Resultados del modelo volumétrico para Hervores de la Vega.

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Hervores de la Vega, Jalisco			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	6	8
Área (km ²)	2	3	7
Espesor (km)	1.5	2	3
Temperatura del yacimiento (°C)	175	220	230
Temperatura ambiente (°C)	1	22	35
Humedad relativa (%)	40%	67%	96%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	5%	12%	15%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2500	2800	2900
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.9	1.1	1.2
Factor de recuperación Rg (%)	5%	15%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.2	2	2.2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **45 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 52 y 53.

El área del probable yacimiento se estimó considerando las tres zonas de interés definidas por los mínimos resistivos detectados por la CFE. El espesor, con base en los espesores estimados para la secuencia andesítica y las rocas subyacentes. La permeabilidad de las rocas del yacimiento debe de ser suficientemente elevada, por lo que no habría problema de recarga profunda hasta la máxima potencia modelada.

Fuentes: Gutiérrez Negrín et al. (1989), López Hernández (1995).

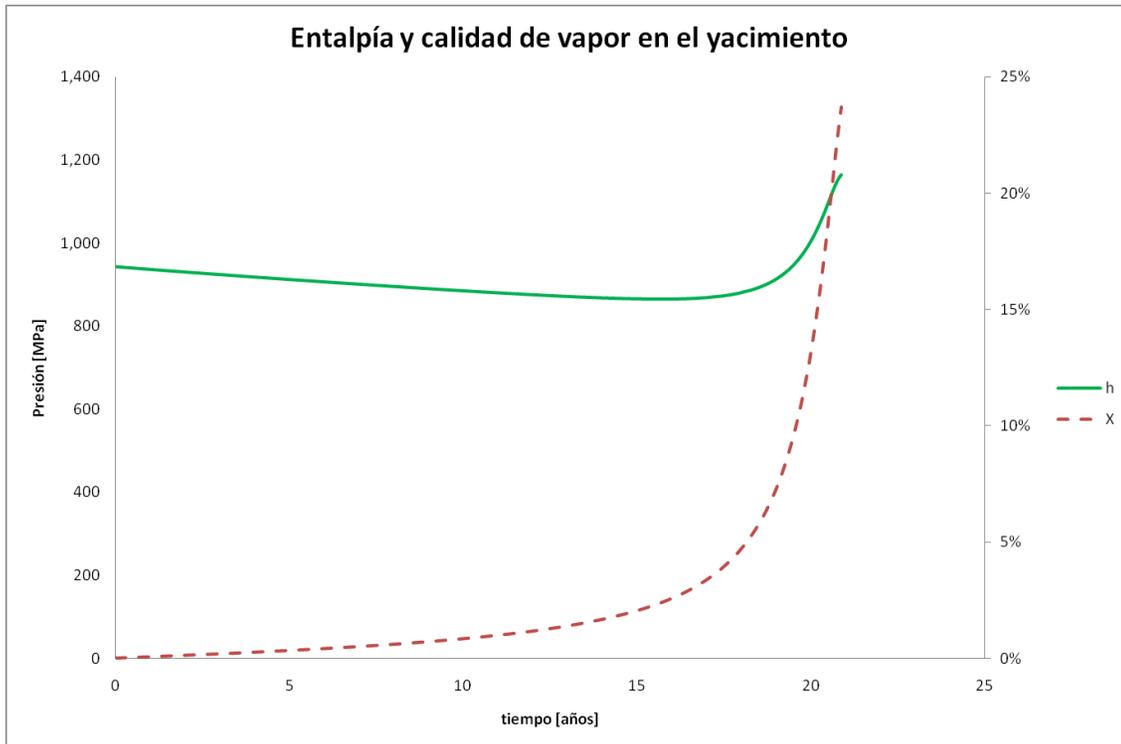


Figura 52. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Hervores de la Vega.

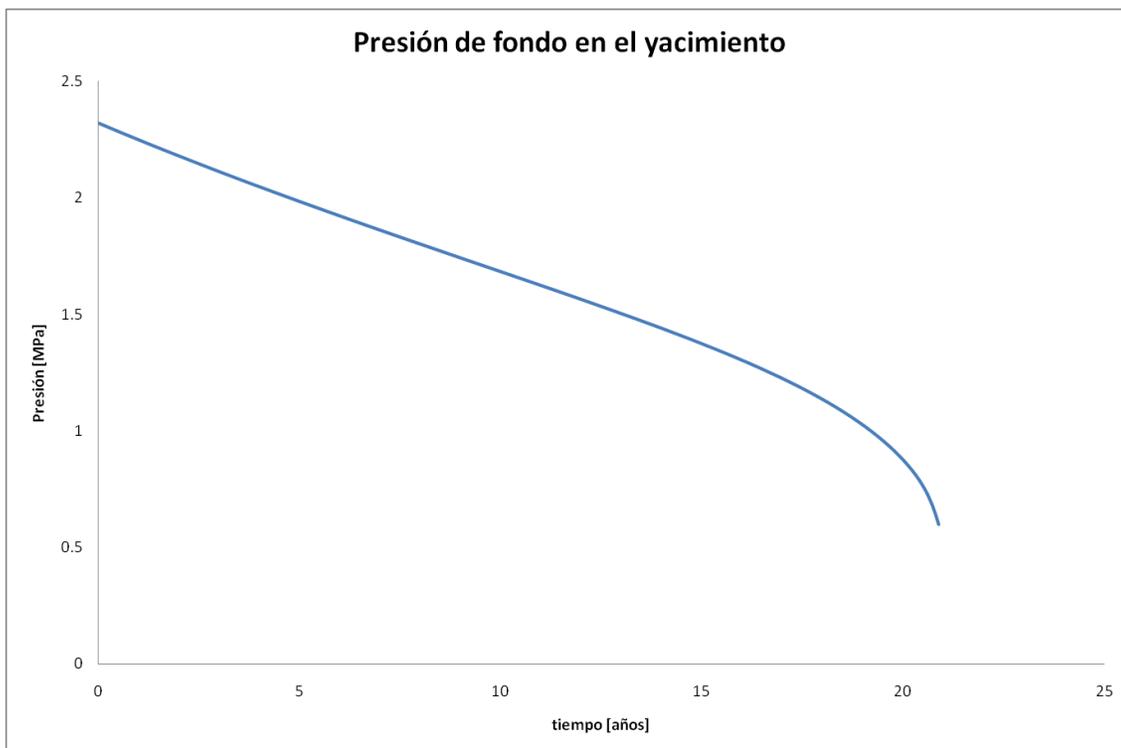
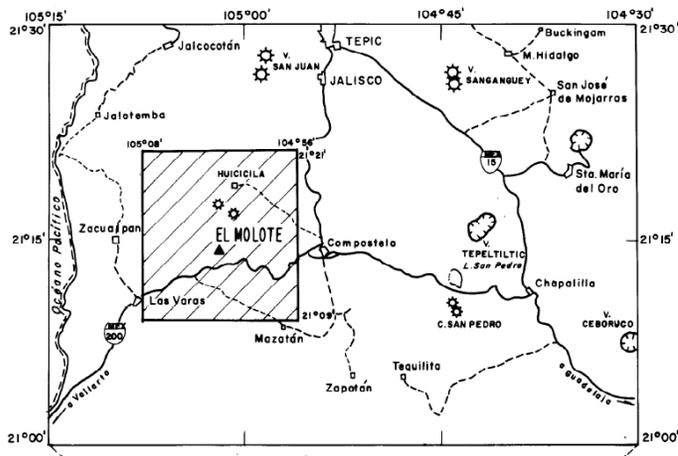


Figura 53. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Hervores de la Vega.

ZONA GEOTÉRMICA DE LOS HERVORES-EL MOLOTE, NAY.

Localización



Esta zona se localiza en la parte sureste del estado de Nayarit, a unos 15 km al occidente en línea recta de la ciudad de Compostela y a unos 50 km al suroeste de Tepic. Sus coordenadas geográficas aproximadas son 21°15' de latitud norte y 105°00' de longitud oeste. El acceso es a través de la carretera federal número 200, en su tramo Compostela-Las Varas. Desde el punto de vista fisiográfico, la zona pertenece al extremo occidental de la Faja Volcánica Mexicana.

Descripción

En la zona y su periferia afloran rocas metamórficas, sedimentarias, vulcanoclásticas, volcánicas e intrusivas, las más antiguas de las cuales son unas filitas de probable edad jurásica. Le sigue en edad un intrusivo clasificado como micrograbro probablemente emplazado en el Cretácico Temprano, sobreyacido por areniscas cretácicas y rocas volcánicas (andesitas e ignimbritas) del Oligoceno-Mioceno. Aflora también un intrusivo granodiorítico emplazado hace 67 millones de años, con una probable reactivación hace unos 20 millones de años. Las rocas volcánicas son las andesitas de los volcanes El Molote, en cuyo cráter se observa una estructura cómica que lo taponan, y Cerro Alto, ambos del Plioceno. Las rocas más recientes son las Andesitas Mazatán extruidas por volcanes cuaternarios ubicados al sur de Mazatán. Las estructuras tienen una orientación principal casi este-oeste, pero los manantiales termales de El Molote están asociados a estructuras de dirección noreste-suroeste.

En la zona se identificaron tres grupos de manantiales termales: El Molote, en la parte central, La Ínsula-Los Hervores, ubicada a unos 7 km al oeste del rancho El Molote, y Agua Caliente-Jamurca localizada al sur y sureste del poblado de Las Varas. El grupo de El Molote está constituido por 14 manantiales distribuidos en una superficie de 3 km² con temperaturas superficiales entre 65 y 91°C, aguas de composición variable de clorurado sódico a bicarbonatado sódico y el geotermómetro de potasio-sodio indica temperaturas de fondo de 134 a 154°C. El grupo de La Ínsula-Los Hervores presenta temperaturas superficiales más bajas (28°C) con agua de composición bicarbonatada-sódica y contenido de boro de hasta 22 ppm, pero el mismo geotermómetro de potasio-sodio infiere temperaturas de fondo de 217 a 232°C. El tercer grupo de manantiales tiene aguas cloruradas sódicas, temperaturas superficiales de 49°C y de fondo de 170°C, estimadas con el mismo geotermómetro.

El yacimiento geotérmico inferido en el subsuelo de la zona podría estar contenido en las rocas intrusivas (granodioritas), y probablemente en las rocas vulcanoclásticas y

sedimentarias. Aunque no hay una evidente fuente de calor en la zona, pues ambos volcanes (El Molote y Cerro Alto) son pliocénicos y actualmente inactivos, es probable la existencia de una intrusión más reciente sin evidencias de vulcanismo, relacionada con una zona de debilidad cortical de dirección NW-SE identificada en la zona.

Estudios realizados

La CFE llevó a cabo estudios geológicos y geoquímicos de detalle en la zona, pero la descartó debido a la presencia de las rocas intrusivas en las cercanías de las manifestaciones de El Molote. En el tiempo de esos estudios, la CFE consideraba poco probable la existencia de un yacimiento en rocas intrusivas, criterios que ya ha cambiado a la fecha, como lo prueba el caso del campo de Las Tres Vírgenes. Sin embargo, nunca se llevaron a cabo levantamientos geofísicos, lo cual tendría que ser uno de los primeros pasos si se pretendiera renovar la exploración en esta zona.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **36 MW** con una desviación estándar de 14 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 12 y 59 MWe.

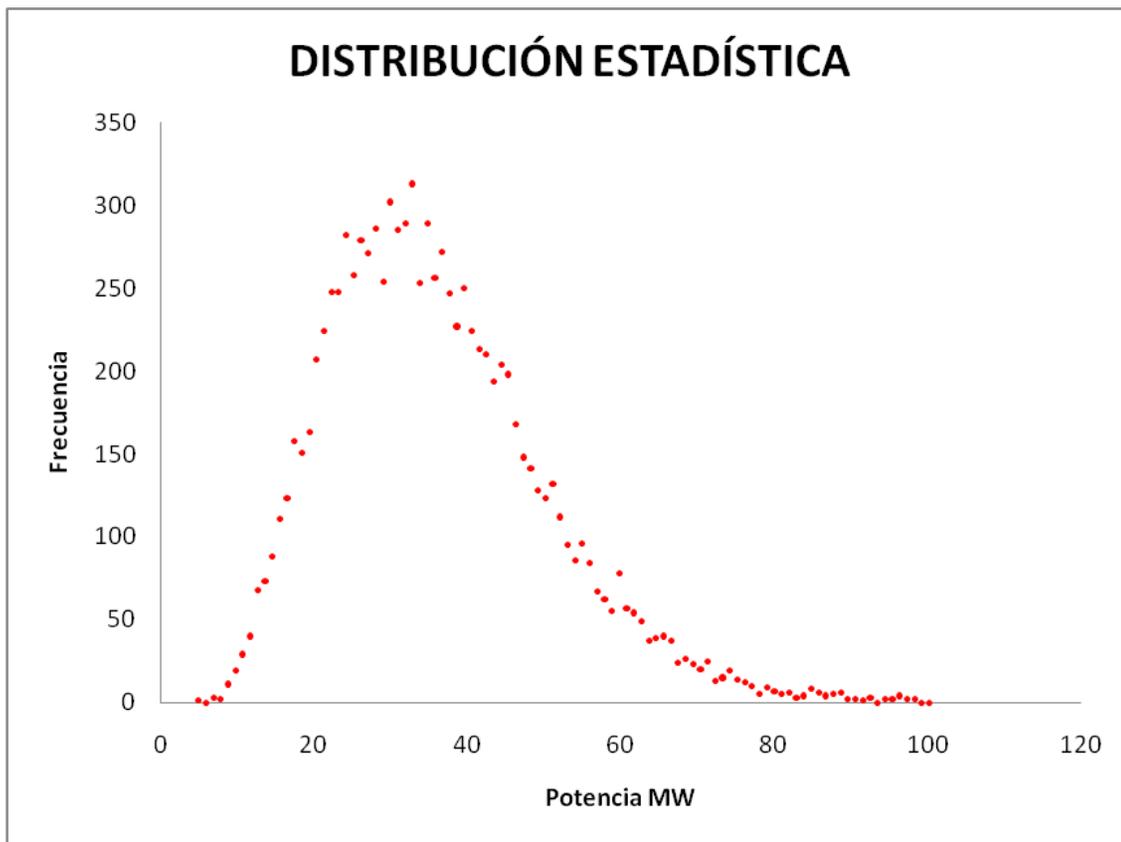


Figura 54. Resultados del modelo volumétrico para Los Hervores – El Molote.

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Los Hervores – El Molote, Nayarit			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	6	7
Área (km ²)	2	4	8
Espesor (km)	1.5	2.5	3
Temperatura del yacimiento (°C)	180	200	230
Temperatura ambiente (°C)	1	22	35
Humedad relativa (%)	40%	67%	96%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	0.50%	5%	10%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2600	2800	2900
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.79	0.95	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	10%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.2	0.3	0.5

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **17 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 55 y 56.

El área del probable yacimiento se estimó considerando la extensión en la que afloran los manantiales termales. El espesor se estimó de acuerdo a las secciones estratigráficas realizadas por la CFE en la zona. La porosidad y permeabilidad secundaria de las rocas intrusivas que podrían alojar a los fluidos del yacimiento se considera suficientemente elevada, por lo que no habría problema de recarga profunda hasta la máxima potencia modelada.

Fuentes: De la Cruz y Hernández (1986), Gutiérrez Negrín et al. (1989).

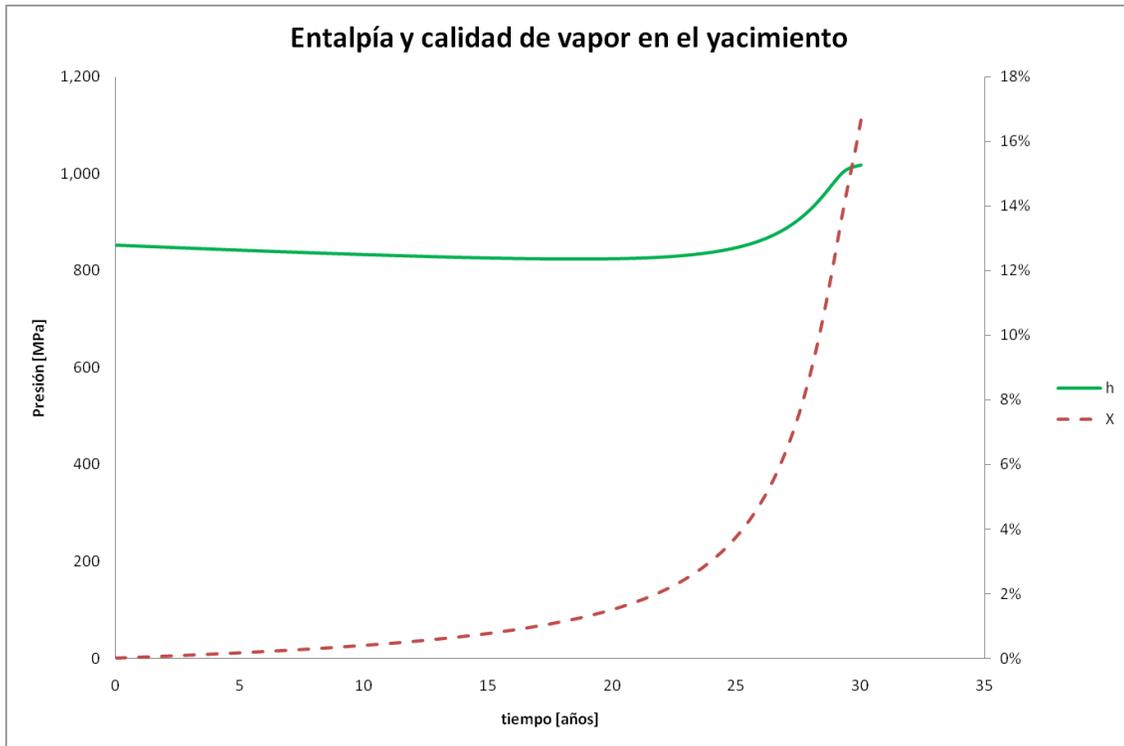


Figura 55. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de Los Hervores – El Molote.

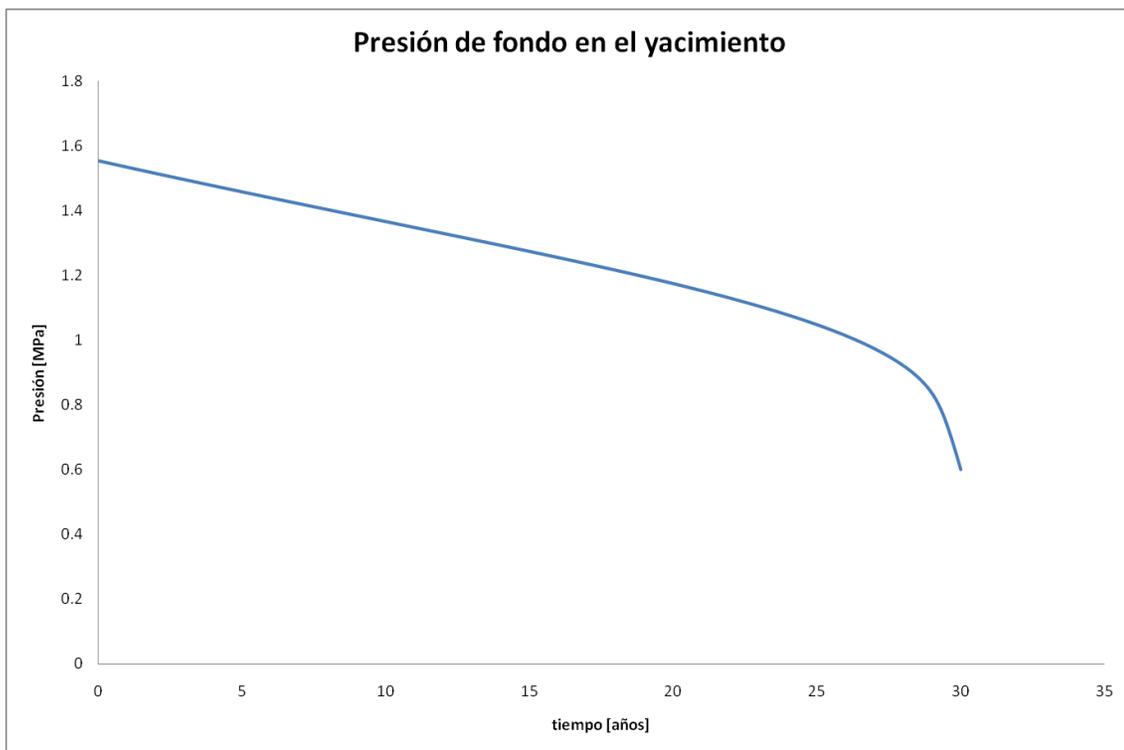
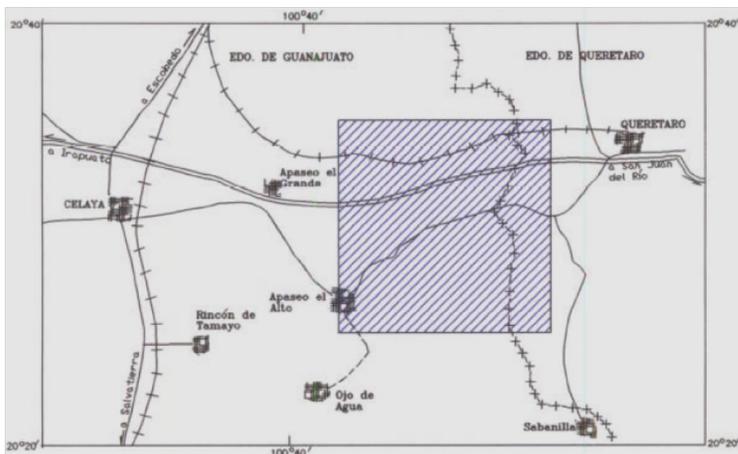


Figura 56. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Los Hervores – El Molote.

ZONA GEOTÉRMICA DE SAN BARTOLOMÉ DE LOS BAÑOS, GTO.

Localización



La zona geotérmica está ubicada en la parte sureste del estado de Guanajuato, cerca de sus límites con el de Querétaro, aproximadamente entre las coordenadas geográficas siguientes: $20^{\circ}26'04''$ - $20^{\circ}36'43''$ de latitud norte y $100^{\circ}26'18''$ - $100^{\circ}37'48''$ de longitud oeste, entre las ciudades de Celaya, Gto., y Querétaro, Qro. Se puede acceder a ella por la autopista de cuota Querétaro-Irapuato, pero es

más accesible por la carretera libre saliendo de Querétaro rumbo a Celaya y llegando a Apaseo el Alto, que es la población más importante de la zona. Fisiográficamente, la zona es parte de la Faja Volcánica Mexicana.

Descripción

En la zona afloran principalmente rocas volcánicas con menor proporción de rocas piroclásticas, depósitos lacustres y aluvión. La base de la columna litológica está formada por riolitas con edades entre 22 y 23 millones de años, que corresponden a la prolongación meridional de la Sierra Madre Occidental, cubiertas por depósitos lacustres y flujos piroclásticos intercalados, basaltos, tobas, andesitas y riolitas de edad miocénica. La actividad volcánica en la zona finalizó con pequeños aparatos monogenéticos de escoria y basalto de edad pliocénica. La zona ha sido afectada por un sistema estructural de dirección norte-sur, conocido como sistema de fallas Querétaro, al cual pertenece la falla local San Bartolomé, con actividad reciente y relacionada con zonas de alteración hidrotermal actuales y fósiles. Otro sistema estructural es de dirección noreste-suroeste, al cual pertenece la falla local Ameche.

Hay tres principales áreas de manantiales y alteración hidrotermal en la zona, conocidas como Laguna El Salitre, Marroquín y San Bartolomé de los Baños, y temperaturas superficiales entre 53 y 95°C , en algunos casos con desprendimiento de gases. La primera es la más importante, cubriendo un área de 1.2 km^2 y presentando depósitos de geiserita. Las aguas de los manantiales son de tipo clorurado sódico, con temperaturas de fondo, según el geotermómetro de potasio-sodio, entre 160 y 180°C . La composición de los gases indica que los fluidos han circulado profundamente en la corteza, habiéndose diluido debido a la presencia de un potente acuífero somero, con temperaturas de fondo de 220°C de acuerdo con el geotermómetro de hidrógeno-argón, considerándose esta como la temperatura más probable.

No existe una fuente de calor localizada para el probable yacimiento, pero el modelo conceptual propuesto por la CFE indica que agua meteórica se infiltra probablemente al norte

y penetra profundamente a través de los productos volcánicos y los rellenos lacustres, adquiriendo una temperatura progresivamente elevada, circula lateralmente hacia la zona y descarga a través de la falla San Bartolomé y la Laguna de El Salitre. Se trataría, por tanto, de un yacimiento no volcánico, de tipo acuífero profundo, cuyos fluidos calientes podrían hallarse entre los 1500 y 2500 metros de profundidad.

Estudios realizados

La CFE ha realizado estudios exploratorios de detalle en la zona, incluyendo geología, geoquímica y geofísica (sondeos eléctricos verticales, magnetometría, termometría, potencial natural y gravimetría). La zona se considera lista para perforar pozos exploratorios.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **7 MW** con una desviación estándar de 3 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 3 y 12 MWe.

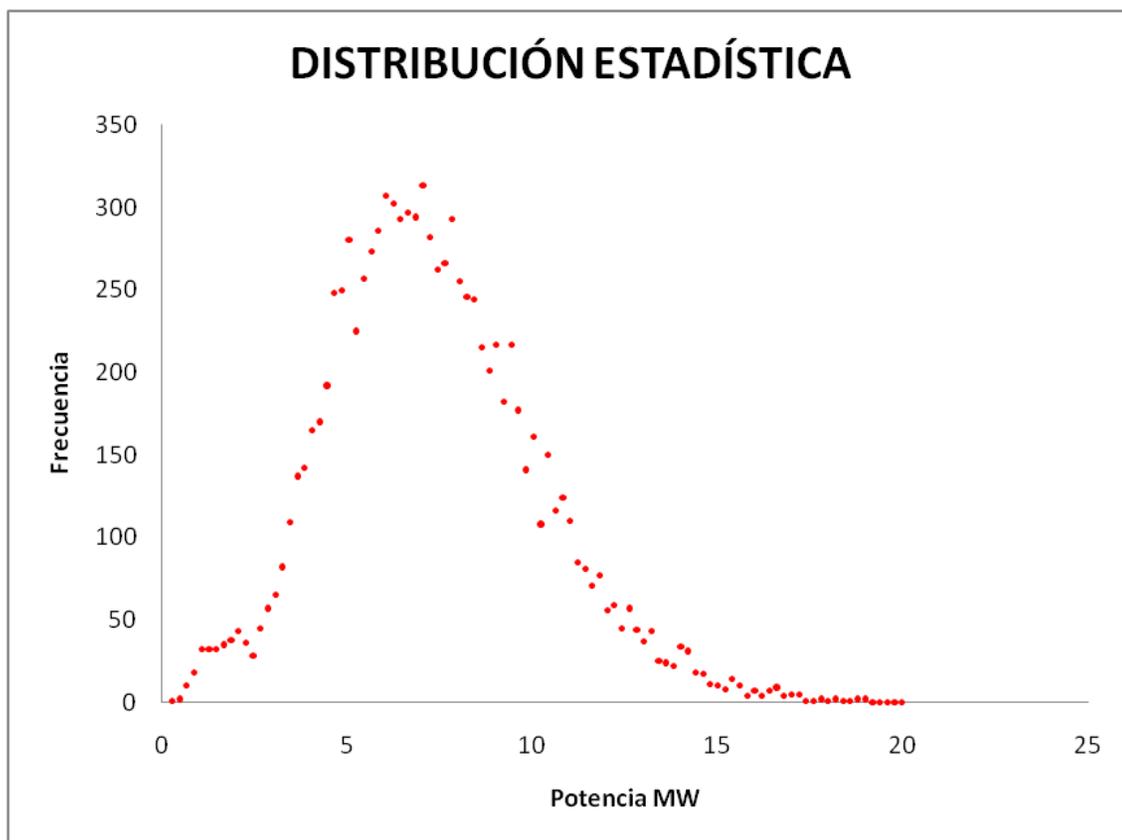


Figura 57. Resultados del modelo volumétrico para San Bartolomé de los Baños.

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

San Bartolomé de los Baños, Guanajuato			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	6	7
Área (km ²)	1	2	2.5
Espesor (km)	0.5	1	1.5
Temperatura del yacimiento (°C)	165	220	230
Temperatura ambiente (°C)	1	20	35
Humedad relativa (%)	29%	53%	78%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	4%	10%	15%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2200	2500	2800
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.79	0.9	1.1
Factor de recuperación R _g (%)	5%	10%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (mildarcy, mD)	0.1	1.5	2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **9 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 58 y 59.

El área del probable yacimiento se estimó considerando la extensión superficial de las zonas de alteración. El espesor se estimó de acuerdo a las secciones preparadas por la CFE en la zona. La porosidad y permeabilidad secundaria de las rocas volcánicas y sedimentarias que podrían alojar a los fluidos del yacimiento se considera suficientemente elevada, por lo que no habría problema de recarga profunda hasta la máxima potencia modelada.

Fuentes: López Hernández (1996).

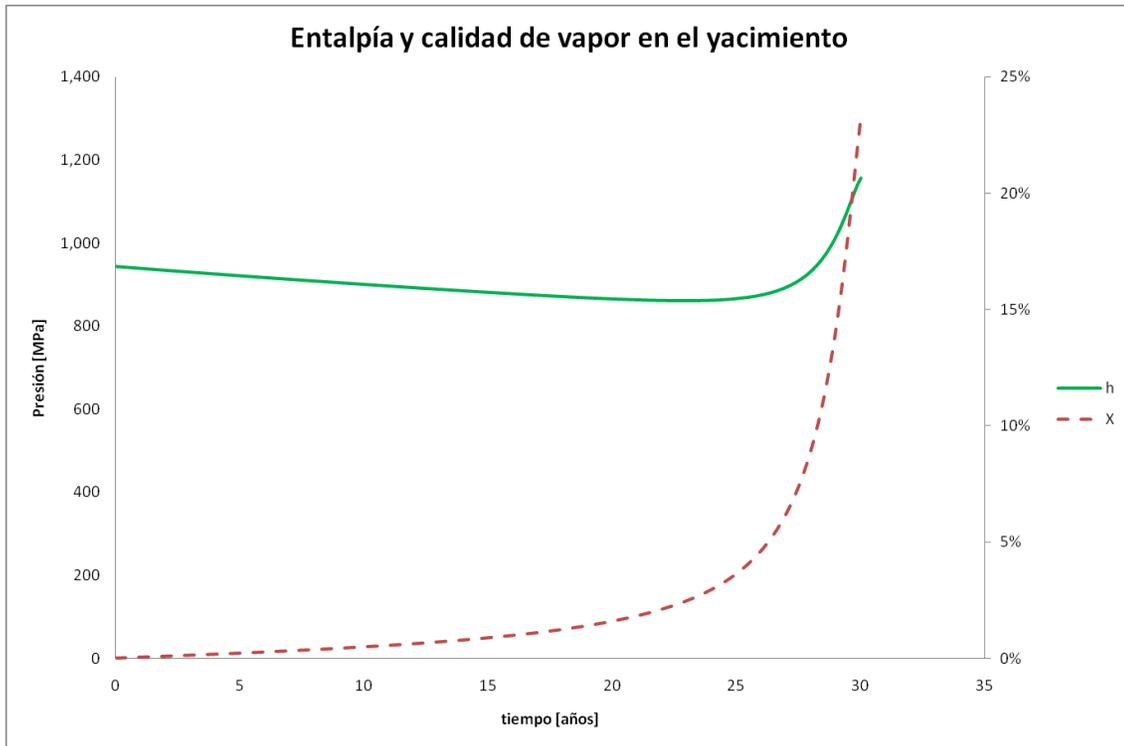


Figura 58. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico de San Bartolomé de los Baños

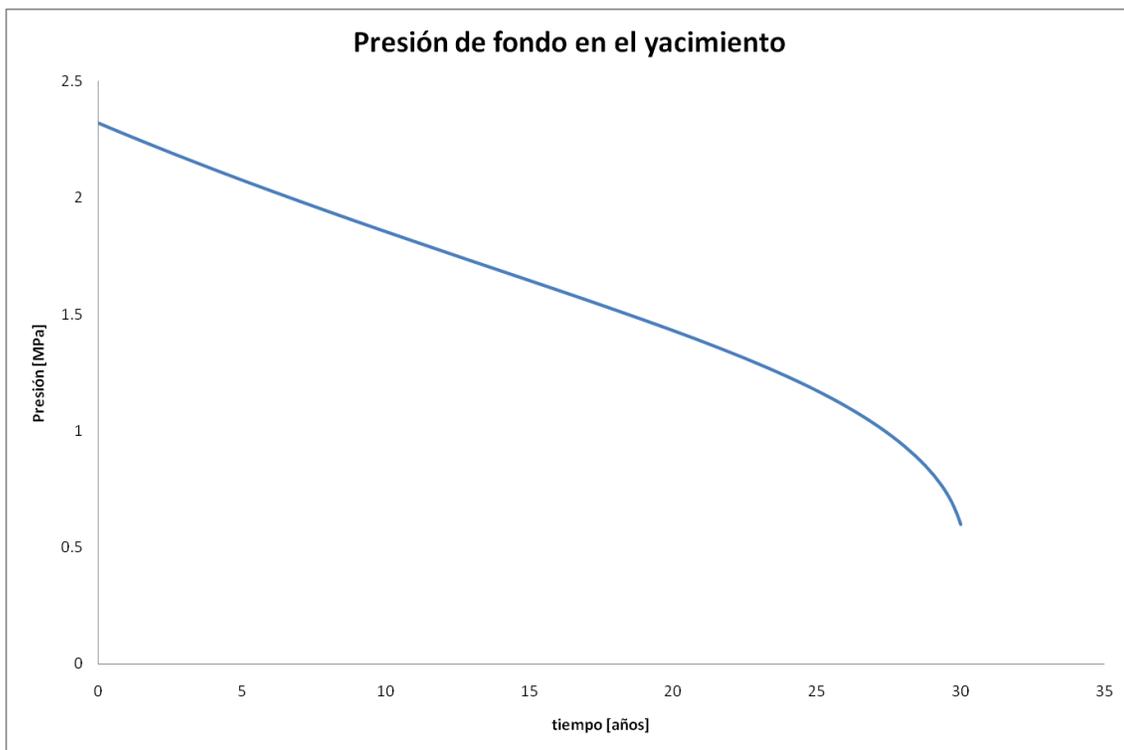


Figura 59. Evolución de la presión para el campo geotérmico de San Bartolomé de los Baños.

ZONA GEOTÉRMICA DE SANTIAGO PAPANQUIARO, DGO.

Localización



Esta zona se encuentra en la porción central del estado de Durango, a unos 180 km en línea recta al noroeste de la ciudad de Durango, aproximadamente en las coordenadas geográficas 25°09'13" de latitud norte y 105°28'20" de longitud oeste. Se puede acceder a la zona partiendo de Santiago Papanquiario con rumbo a Tepehuanes, y al llegar al poblado de Los Herrera se toma una terracería con dirección al este, paralela a la vía del ferrocarril, hasta llegar al balneario Los Hervideros. Fisiográficamente, la zona se encuentra en la provincia de la Sierra Madre Occidental, a una elevación media de 1700 msnm.

Descripción

Las rocas aflorantes en la zona pertenecen a las secuencias típicas de la Sierra Madre Occidental, y comprenden andesitas en su base sobreyacidas por un grueso paquete de riolitas, tobas y/o ignimbritas, que se emplazaron desde fines del Oligoceno hasta el Mioceno. Las rocas restantes corresponden a extensos y potentes espesores de conglomerados. Los manantiales de Los Hervideros brotan en un probable domo riolítico, que puede tener una edad más reciente (Mioceno Tardío-Plioceno Temprano), asociados a una veta silícea emplazada en una falla regional de dirección noroeste-sureste. Las estructuras principales son fallas normales de dirección noroeste-sureste, que en la zona forman una depresión tectónica de forma burdamente triangular (Depresión Santiago Papanquiario), en cuya parte norte se hallan los manantiales de Los Hervideros. Se identificaron también algunos pequeños diques de composición basáltica emplazados en las riolitas y tobas del paquete superior de la Sierra Madre Occidental.

Se identificaron en la zona y sus alrededores 12 manantiales termales concentrados en cinco localidades, con temperaturas entre 33 y 75°C. Las de mayor temperatura son las conocidas como Sandías y Los Hervideros, ambas prácticamente en las márgenes del Río Tepehuanos. El agua de los manantiales tiene una composición bicarbonatada sódica, calculándose temperaturas de fondo de 170°C.

En esta zona no existe una probable fuente de calor, debido entre otras cosas a la ausencia de vulcanismo cuaternario. El probable yacimiento geotérmico sería del tipo de acuífero profundo y de temperatura intermedia, con aguas que circulan a profundidad a través de fallas normales y son forzadas a aflorar con escasa pérdida de temperatura. El agua podría estar contenida en los rellenos conglomeráticos que se asume rellenan la Depresión Santiago Papanquiario, pero también en las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental.

Estudios realizados

La CFE ha realizado estudios de geología y geoquímica de detalle, así como sondeos eléctricos verticales. Con base en los resultados de esos estudios, en 1997 se localizó y perforó un pozo exploratorio denominado HE-1, que empezó a perforarse con diámetro de 25 cm y terminó con diámetro de 7.6 cm a 456 m de profundidad. El pozo registró una temperatura máxima de 73°C a 260 m de profundidad, considerándose que quedó en una parte marginal del probable yacimiento geotérmico debido a que no atravesó la estructura principal. Los primeros 67 metros fueron de conglomerados y de ahí al fondo el pozo atravesó tobas riolíticas, observándose minerales de alteración hidrotermal (cuarzo, pirita, epidota, clorita) entre los 100-180 m de profundidad.

Potencial preliminar

Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **4 MW** con una desviación estándar de 2 MW y el intervalo de confianza al 90% es de entre 1 y 7 MWe.

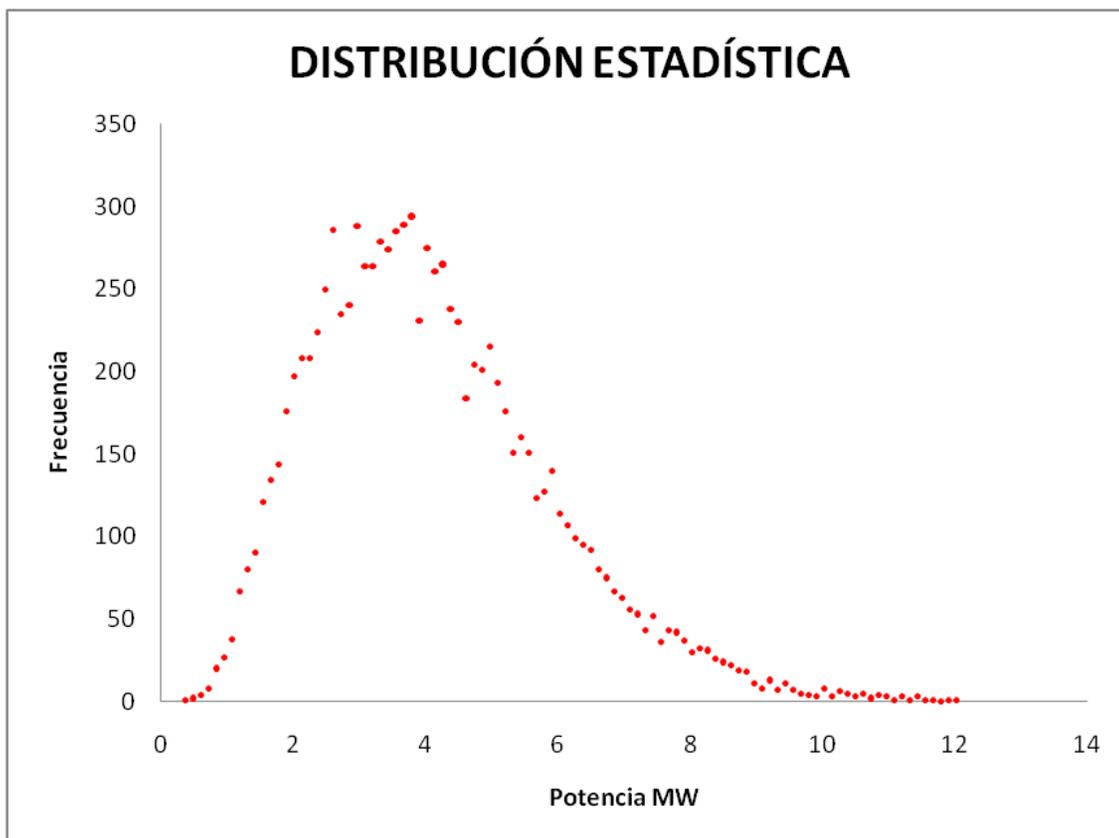


Figura 60. Resultados del modelo volumétrico para Santiago Papasquiario.

Los parámetros utilizados en el modelo fueron los siguientes:

Santiago Papasquiario, Durango			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	5.5	6
Área (km ²)	2	2.5	4
Espesor (km)	0.7	1.2	1.5
Temperatura del yacimiento (°C)	160	170	180
Temperatura ambiente (°C)	1	20	35
Humedad relativa (%)	29%	53%	78%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	5%	12%	15%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2600	2700	2800
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.79	0.95	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	13%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.1	1.5	2

Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **4 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 61 y 62.

El área máxima del probable yacimiento se estimó asumiendo un 5% de la extensión superficial que se asume cubre la isoterma superficial de 70°C. El espesor se estimó de acuerdo a los espesores esperados para las rocas del subsuelo. La porosidad y permeabilidad secundaria de las rocas volcánicas que podrían alojar a los fluidos del yacimiento se considera suficientemente elevada, por lo que no habría problema de recarga profunda hasta la máxima potencia modelada.

Fuentes: Castillo Hernández (1996, 1998).

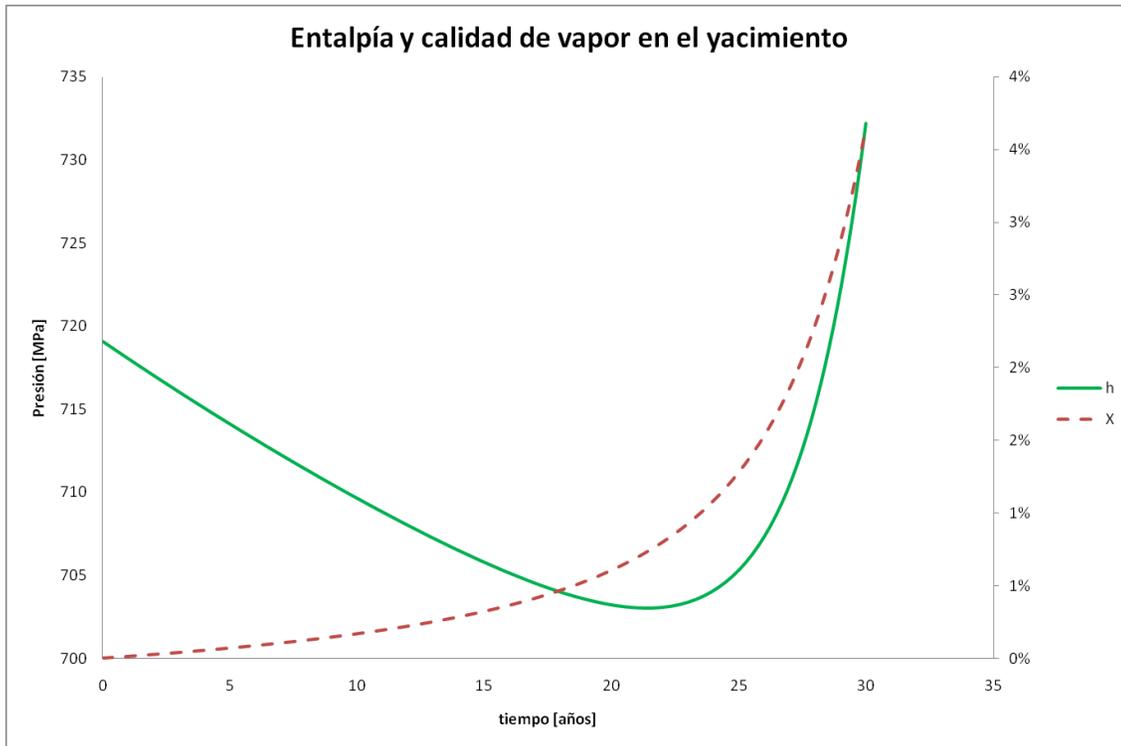


Figura 61. Evolución de la entalpía (línea continua) y la calidad de vapor (línea discontinua) para el campo geotérmico Santiago Papasquiario.

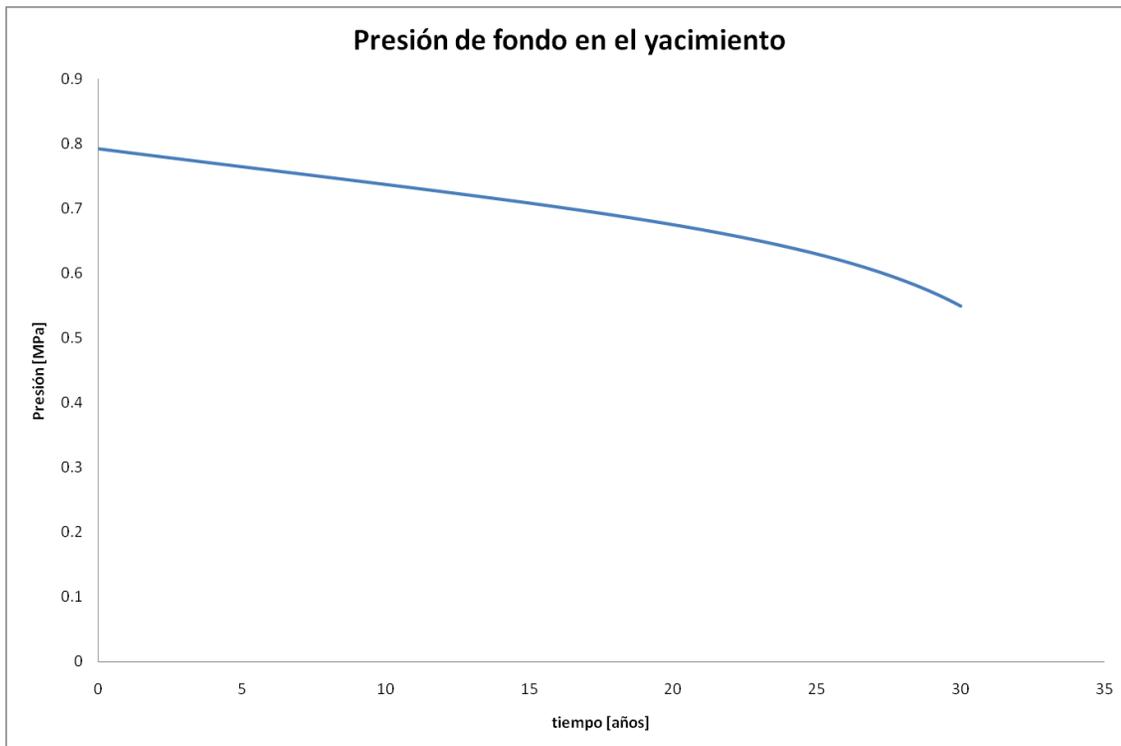


Figura 62. Evolución de la presión para el campo geotérmico de Santiago Papasquiario.

1.4. ZONAS CON RECURSOS DE ROCA SECA CALIENTE

Para estimar el potencial geotérmico del país a partir de recursos de roca seca caliente, que podrían aprovecharse para generar energía eléctrica con tecnologías de mejora a través de los llamados sistemas geotérmicos mejorados (EGS), debe partirse de una estimación de la energía térmica almacenada en el subsuelo del país.

En el mundo, la energía térmica total almacenada en la litósfera, es decir hasta una profundidad media de 50 km, ha sido estimada en 5.4×10^9 EJ (Dickson y Fanelli, 2003). Las dos fuentes últimas de esta energía son, por un lado, el flujo de calor proveniente del núcleo y manto terrestres, y por otro el decaimiento de isótopos radiactivos (básicamente uranio, torio y potasio) contenidos en las propias rocas de la litósfera. El calor se transfiere del interior de la tierra hacia la superficie por conducción y en el manto por corrientes de convección, a una tasa promedio estimada en 1400 EJ anuales. Debajo de los continentes esta tasa es de unos 315 EJ/año, lo que resulta en un flujo unitario de calor promedio estimado entre 59 y 65 miliwatts por cada metro cuadrado (mW/m^2) de superficie continental (Steffanson, 2005; Tester et al., 2006).

El flujo térmico, también conocido como densidad de flujo de calor, se define como la cantidad de calor que pasa por una superficie por unidad de tiempo y por unidad de área, cuando la superficie se somete a un diferencial de temperatura entre sus caras. Se puede calcular empleando métodos convencionales o métodos geoquímicos. Los primeros se basan en la ecuación de Fourier: $f = K dt/dz$, en la que K es la conductividad térmica, t es la temperatura y z la profundidad. Como se observa, en su expresión unidimensional esta ecuación indica simplemente que el flujo de calor es igual a la conductividad térmica por el gradiente térmico. El gradiente térmico vertical define el aumento de temperatura a medida que aumenta la profundidad, y su promedio normal en el mundo oscila entre 25 y 30°C por kilómetro de profundidad. Puede determinarse en un sitio específico mediante pozos perforados expresamente para el efecto, diseñados para evitar la entrada de flujos convectivos a su interior. La conductividad térmica, por su parte, se define como la capacidad de un material de conducir calor y puede obtenerse por métodos de laboratorio o por mediciones in situ (García, 1989).

Los métodos geoquímicos aplicados para estimar flujo de calor son básicamente dos: el del geotermómetro de sílice y el de la relación isotópica del helio. El primero fue desarrollado originalmente por Swamberg y Morgan (1979, citado por García, 1989) como una ecuación empírica que permite relacionar la temperatura de equilibrio de fondo calculada a partir del contenido de sílice en el agua de un manantial o pozo, con el flujo térmico. Se expresa como: $TSiO_2 = m f + b$, en la cual $TSiO_2$ es la temperatura de fondo estimada con el geotermómetro de sílice conductiva en grados centígrados, f es el flujo térmico, y m y b son constantes de ajuste por regresión. A su vez, la temperatura de fondo puede calcularse a partir de la concentración de sílice determinada en el agua del manantial o pozo, mediante el geotermómetro de sílice, que es una ecuación empírica propuesta por Truesdell (1976, citado por García, 1989) y que se expresa como: $TSiO_2 = [1315/(5.205 - \log CSiO_2)] - 273.15$, en la que $CSiO_2$ es la concentración de sílice en el agua superficial expresada en partes por millón.

El método del cociente de los isótopos de helio fue originalmente propuesto por Polak et al. (1979, 1980, citado por García, 1989). Parte del supuesto de que el isótopo He-3 era relativamente abundante al formarse el planeta y que desde entonces ha ido disminuyendo, mientras que con el isótopo He-4, producto de la emisión de partículas alfa a partir del decaimiento radiactivo del uranio y del torio contenidos en rocas de la corteza, ocurre justamente lo contrario. Los autores observaron la siguiente correlación empírica: $f = 0.166 \ln R + 3.95$, donde f es el flujo térmico en unidades de flujo de calor (HFU) y R es la relación isotópica He-3/He-4. Esta correlación se supone válida para un intervalo de valores de flujo térmico entre 0.9 y 2.2 UHF (equivalente a 37.7 y 96.3 mW/m²); es decir, si al aplicar la ecuación se obtiene un valor de f mayor o menor de ese rango, se considera no representativo por estar afectado por perturbaciones locales.

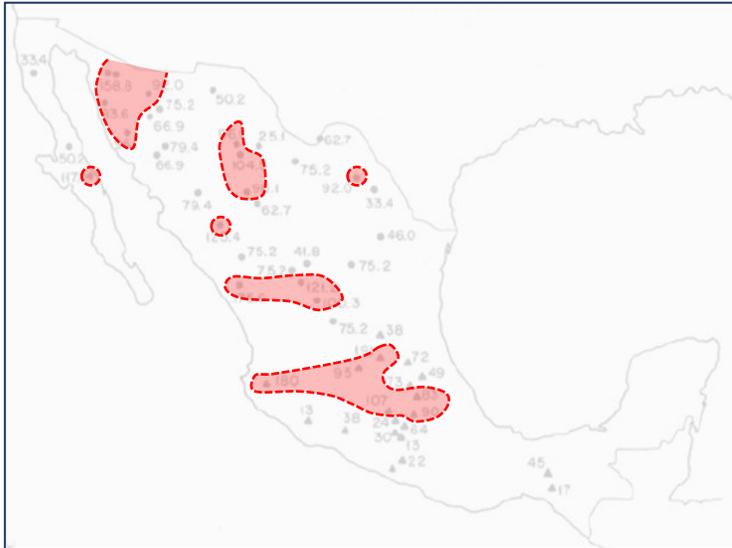


Fig. 63. Flujo de calor con el método convencional en mW/m², indicando áreas anómalas (modificado de Prol-Ledesma, 1991)

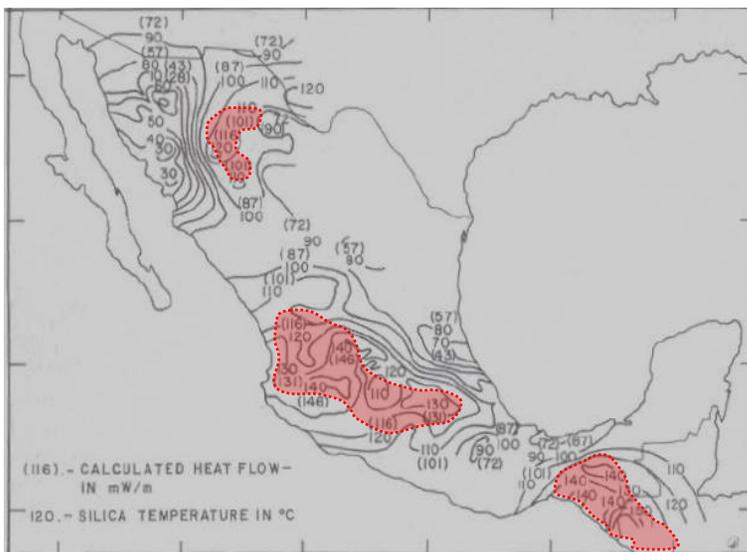


Fig. 64. Temperaturas de fondo con el geotermómetro de sílice, flujo de calor estimado y zonas anómalas (modificada de Prol-Ledesma, 1991).

En México se ha aplicado el método convencional y ambos métodos geoquímicos para realizar estimaciones parciales de flujo de calor. De acuerdo con Prol-Ledesma (1991), se cuenta con 53 mediciones directas de flujo de calor aplicando el método convencional en pozos exploratorios y minas distribuidas en diversas partes del país, en los sitios mostrados en la Figura 39. Como se ve en ella, el flujo térmico varía entre un mínimo de 13 y un máximo de 191 mW/m², y aunque los datos están demasiado dispersos pueden identificarse algunas regiones con flujos de calor más elevados.

Por otra parte, Prol y Juárez (1986, citado por Prol-Ledesma, 1991) utilizaron datos de temperaturas de fondo obtenidos con el geotermómetro de sílice calculados para 326 manantiales termales en México para estimar

flujos de calor, sin tomar en cuenta muestras de los campos geotérmicos a fin de evitar desviaciones locales. En la Figura 40 se presentan las temperaturas de equilibrio de fondo calculadas con este geotermómetro y expresadas en grados centígrados, así como los valores de flujo de calor expresados en mW/m^2 . Pueden definirse tres regiones con flujos de calor superiores a $100 \text{ mW}/\text{m}^2$, y consideradas por tanto como anomalías térmicas. La zona norte podría relacionarse con la propuesta prolongación meridional del Rift del Río Grande hacia México. La zona anómala central parece estar asociada con la Faja Volcánica Mexicana (y probablemente con el Graben de Tepic-Zacoalco, que también ha sido postulado como una incipiente zona de rift). La zona con valores mayores de $100 \text{ mW}/\text{m}^2$ definida en la parte sur del país estaría relacionada con la Faja Volcánica de Centroamérica (Prol-Ledesma, 1991).

En cuanto a la estimación de flujo de calor mediante la relación isotópica del helio, Polak et al. (1985) tomaron 22 muestras de agua termal provenientes tanto de manantiales como de algunos pozos geotérmicos ubicados en la porción central del país, y la mayoría dentro de la provincia de la Faja Volcánica Mexicana, y determinaron la relación isotópica en cada una, aplicando la ecuación empírica comentada antes. Sus resultados se presentan en la Figura 41, en la que puede verse que varias de las muestras fueron tomadas de pozos de los campos de Los Humeros, Los Azufres y La Primavera y de algunas de las zonas geotérmicas cuyas fichas se presentaron en este mismo capítulo. En general, todos los valores de flujo de calor estimados por este método son superiores a $70 \text{ mW}/\text{m}^2$ para muestras colectadas dentro de la Faja Volcánica Mexicana, destacando el sitio marcado con el número 10, que corresponde a la zona geotérmica de Acozulco cuyo valor es comparable con los de los campos geotérmicos en explotación.

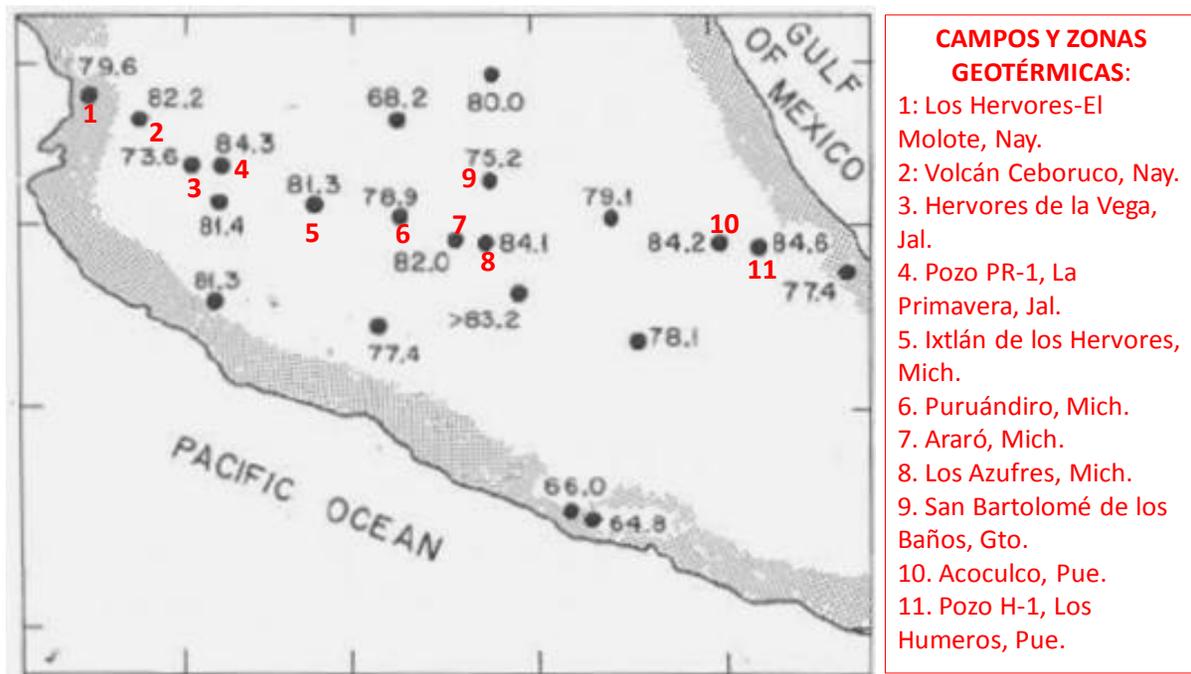


Fig. 65. Estimación de flujo de calor en mW/m^2 en la parte central de México empleando la relación isotópica del helio (modificada de Polak et al., 1985, y García, 1989).

Los valores de flujo de calor disponibles en México no son suficientes como para elaborar un plano completo y definir provincias de flujo de calor, tal como se ha señalado antes (García, 1989; Prol-Ledesma, 1991). Pero parece evidente que, pese a la escasez de los datos, todos los métodos coinciden en identificar ciertas regiones con flujos de calor superiores a la media. Entre ellas está la ubicada en la parte norte del país, identificada tanto en la figura X como en la Y con flujos de calor del orden de 100 mW/m^2 , y que en principio podría relacionarse con la probable prolongación hacia México del Rift del Río Grande, que en Estados Unidos presenta valores altos de flujo de calor. Otra zona anómala es sin duda la de la Faja Volcánica Mexicana, identificada en las figuras 39, 40 y 41, con valores de flujo de calor iguales o superiores también a los 100 mW/m^2 de acuerdo al método convencional y al del geotermómetro de sílice, y mayores de 70 mW/m^2 según el del cociente isotópico de helio. Finalmente se encuentra la zona sur, con valores de flujo de calor del mismo orden de 100 mW/m^2 , donde sólo se han realizado estimaciones con el geotermómetro de sílice pero que en efecto parece relacionarse con el vulcanismo de la trinchera centroamericana. Otra zona de probable alto flujo de calor que parece señalar el método convencional es la de la porción noroeste (Fig. 39), que ha sido relacionada con la provincia de Cuencas y Sierras que en Estados Unidos (donde es conocida como *Basin and Range*) presenta valores elevados de flujo de calor.

Un mapa de flujo de calor es el punto de partida para estimar la energía térmica almacenada en el subsuelo de una región determinada o de un país. Por ejemplo, el estudio publicado en 2006 por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) para evaluar el potencial geotérmico de Estados Unidos desarrollable con tecnologías tipo EGS, partió justamente de la información sobre el flujo de calor superficial incluida en el Mapa Geotérmico de Norteamérica publicado en 2004 por la American Association of Petroleum Geologists, incluyendo información contenida en varias bases de datos nacionales sobre gradiente térmico y conductividad térmica en 4000 diferentes puntos del país, así como datos de temperatura de fondo de pozos (BHT: *Bottom Hole Temperature*) en más de 20 mil puntos distintos. Pero además el grupo del MIT recopiló o estimó la variación de la conductividad térmica con la profundidad, la radiactividad de las rocas corticales, el espesor promedio de la capa de rocas radiactivas, el flujo de calor regional o del manto (es decir, el flujo que viene de debajo de la capa radiactiva) y la temperatura ambiental superficial. Con estas bases, se pudo determinar que la energía térmica del subsuelo en Estados Unidos contenida en formaciones sedimentarias y en las rocas cristalinas del basamento a profundidades entre 3 y 10 km era de 13.4 millones de EJ (Tester et al., 2006).

En México se carece de la información básica para intentar un estudio similar. Sin embargo, en 1978 el Electric Power Research Institute (EPRI), con sede en Palo Alto, California, Estados Unidos, preparó un reporte especial para la Comisión de Conservación de la Conferencia Mundial de Energía (WEC: *World Energy Conference*). Como primera parte de ese estudio, el EPRI estimó la energía térmica almacenada en el subsuelo de los países miembros de la WEC y de muchos no miembros, hasta una profundidad de 3 km. Para su estimación, el EPRI partió de las premisas siguientes (EPRI, 1978):

- Todas las áreas continentales ‘normales’ del mundo tienen un gradiente geotérmico vertical de 25°C por km de profundidad.

- Hay ciertas ‘fajas geotérmicas’ en el mundo donde el gradiente térmico vertical es más alto, que están asociadas esencialmente con los límites de las placas tectónicas donde ocurren también fenómenos sísmicos y volcánicos. Se definió en cada país si éste se hallaba completa o parcialmente dentro de algunas de esas fajas geotérmicas, y en este último caso qué porcentaje de su extensión territorial quedaba dentro.
- Del área total que en cada país quedaba dentro de alguna o algunas de esas fajas geotérmicas, se estimó que el 90% de la misma tenía un gradiente geotérmico de 40°C/km mientras que en el 10% restante el gradiente era del doble (80°C/km).
- La temperatura ambiental promedio se asumió en 15°C.
- Se establecieron cuatro rangos de temperatura del subsuelo: menos de 100°C, 100-150°C, 150-250°C y más de 250°C.
- Se asumió un calor específico volumétrico (C_v) promedio de 2.5 J/cm³ °C.
- La energía térmica almacenada para cierto rango de temperatura se definió por la ecuación: $Q = (A) (H) (C_v) (T-15)$, donde Q es la energía térmica, A es el área, H el espesor, C_v el calor específico y T la temperatura. Si A se expresa en cm² y H en cm, la ecuación se convierte en: $Q = (2.5) (A) (H) (T-15) J$.
- Se asumió que en todos los rangos de temperatura un 20% de la energía térmica estimada estaría almacenada en el agua y vapor atrapado en la roca y el 80% en la matriz rocosa.

Para el caso de México, el EPRI asumió que el 60% de su extensión territorial de 2 millones de km² cae en una o más de las ‘fajas geotérmicas’ definidas y obtuvo las estimaciones siguientes:

Rango de temperatura:	<100°C	100-150°C	150-250°C	>250°C	Total
Energía térmica en EJ:	450,000	260,000	67,000	4,200	781,200

Calor total almacenado a 3 km de profundidad en México (EPRI, 1978)

De acuerdo con las presunciones del EPRI, de ese total un 20% correspondería a recursos hidrotermales (calor almacenado en agua y vapor de agua) y el 80% a recursos de roca seca caliente, que actualmente podrían desarrollarse con tecnologías de EGS. Por lo tanto, si se excluyen los recursos hidrotermales, el calor almacenado total se reduce a 629,960 EJ. Pero, por otro lado, los recursos con temperatura menor de 100°C difícilmente podrían utilizarse para generar energía eléctrica, siendo más bien aprovechables en aplicaciones directas que requieran calor. Así, si sólo se toman en cuenta los recursos con temperatura superior a 100°C, el calor almacenado en el país hasta una profundidad de 3 km sería: $(260,000 + 67,000 + 4,200) (0.8) = 264,960$ EJ.

Para convertir la energía térmica almacenada a un potencial eléctrico probable, debe estimarse primero la cantidad de calor que podría ser recuperado en superficie. El estudio del MIT para Estados Unidos (Tester et al., 2006) estimó que, recuperando sólo el 2% de la energía térmica almacenada en el subsuelo de ese país entre 3 y 10 km de profundidad, se podría instalar una capacidad eléctrica total de 1249 GW, asumiendo que se instalarían plantas de ciclo binario con diversas eficiencias del ciclo térmico en función de la temperatura del recurso, un factor de planta promedio anual del 90% y una vida útil de 30 años. Si se utilizan las mismas presunciones de ese estudio para el caso de México, se obtiene que con los 264,960 EJ de energía térmica en el subsuelo a 3 km de profundidad se podría instalar una capacidad de 24.7 GW eléctricos.

Por supuesto, la adopción de todas las premisas del estudio del MIT al caso de México no es del todo válida, en primer lugar por la ausencia de datos de flujo de calor en el país. Pero, adicionalmente, para Estados Unidos el estudio del MIT incluyó recursos con temperaturas de 150°C en adelante y profundidades entre 3 y 10 km, mientras que los datos del EPRI empleados para México consideran recursos con temperatura mayor de 100°C y profundidades entre 0 y 3 km. Con todo, el potencial técnico obtenido puede ser una primera aproximación que se halla dentro del mismo orden de magnitud del verdadero.

Por lo tanto, puede concluirse que el potencial geotermoeléctrico de México con recursos de roca seca caliente, susceptible de ser desarrollado con tecnologías de sistemas geotérmicos mejorados (EGS), es del orden de los 24,700 MW para una profundidad máxima de 3000 metros. Este potencial técnico resulta ser 25 veces superior a la capacidad geotermoeléctrica instalada actual en el país, y alrededor del 48% de la capacidad eléctrica total instalada en México para el servicio público.

1.5. POTENCIAL GEOTÉRMICO DE MÉXICO CON RECURSOS HIDROTERMALES SUBMARINOS

El movimiento de las placas tectónicas produce la subducción de una placa debajo de la otra originando la formación de cuerpos magmáticos que pueden dar lugar a procesos volcánicos en superficie y a yacimientos geotérmicos de tipo hidrotermal en los continentes, donde las condiciones de almacenamiento de agua y permeabilidad del subsuelo lo permiten. Sin embargo, un fenómeno poco estudiado es el posible aprovechamiento del calor de la corteza terrestre que sube hasta el lecho marino cuando hay separación de placas. Según algunos investigadores (Baker and German, 2004) en el lecho marino hay 67,000 km de grietas submarinas o cordilleras volcánicas submarinas en cuya cima está surgiendo continuamente lava. Al fluir la lava en el lecho marino, este se calienta y se emiten fuertes corrientes verticales de agua muy caliente asociada a gases y minerales.

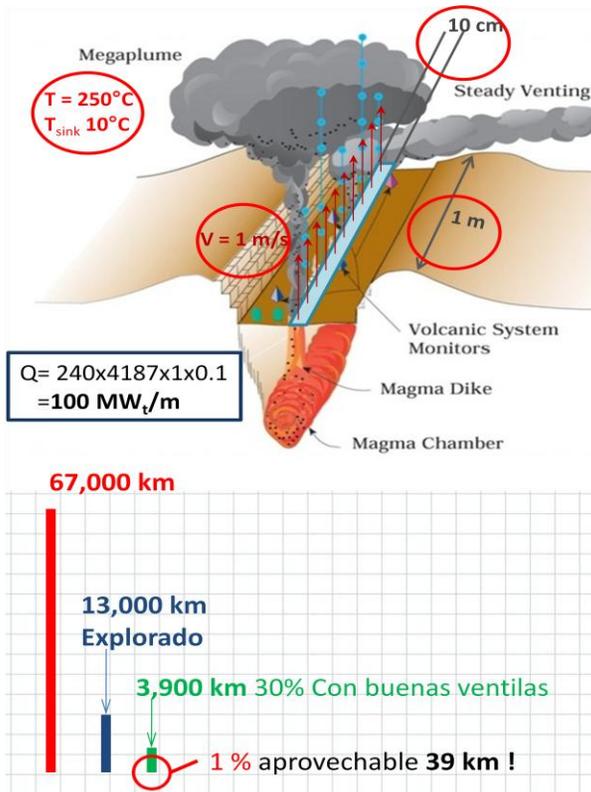
Hiriart et al. (2010) han hecho una estimación de la energía térmica que se emite en el mundo a través de estas ventilas y realizado una estimación muy gruesa sobre este flujo de energía. Para evaluar la energía eléctrica que se podría obtener de esas ventilas hidrotermales submarinas, sin perforar en los alrededores de las mismas, han llegado a una eficiencia de transformación de alrededor del 4%, tomando en cuenta un aprovechamiento de sólo el 10% del calor emitido por la ventila y transformándolo en electricidad mediante una planta submarina, descrita en su trabajo, con una eficiencia global del 40%. Es decir de cada MW térmico de una ventila se obtendrían 40 kW eléctricos. Con estas consideraciones se han analizado ventilas de 1 metro de largo por 10 cm de ancho que emiten agua caliente a 250°C a una velocidad de 1m/s y se ha calculado que la potencia térmica de estas ventilas podría ser de unos 100 MW térmicos por metro. Es decir, podrían extraerse unos 4 MW eléctricos por metro lineal.

Por otro lado, Canet et al. (2005) y Pro-Ledesma et al. (2008) han descrito las ventilas que se han detectado en el Golfo de California aunque no han precisado todavía su extensión y flujo de calor.

Como una estimación preliminar sobre el potencial de energía eléctrica que eventualmente se podría obtener de esta fuente natural submarina en México, aunque no se tenga cuantificada con precisión su extensión, podemos estimar conservadoramente una extensión de 10 km para la Fosa de Wagner, ubicada en el Golfo de California. Si sólo se pudiera aprovechar el 1% de la energía térmica que fluye en esa fosa, se podrían generar unos 100 MW eléctricos. Para el caso de la Fosa de Guaymas, donde la extensión y temperatura de las ventilas es mucho mayor, se podrían generar unos 500 MW eléctricos. A esto habría que sumarle otro tanto adicional por todas las otras fuentes de ventilas submarinas aún no cuantificadas, como canal Ballenas y otras afuera del golfo frente a Punta Mita y a La Bufadora.

Como conclusión muy preliminar y conservadora, se estima que en el potencial geotermoeléctrico con recursos hidrotermales submarina en el Golfo de California y en la

plataforma continental de México es del orden de 1200 MW. Este potencial debe considerarse como una estimación muy preliminar, que requiere ser estudiado con más detalle.



Potencial Mundial:
 (estimación muy conservadora)
156 000 MWe !!

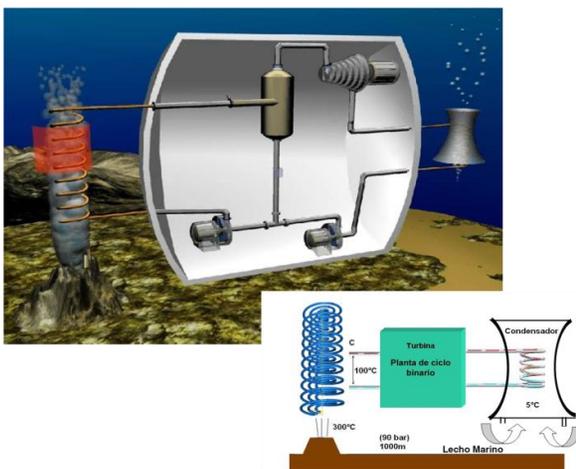
Potencia = $100 \times 0.04 \text{ MWe}$
 = **4 MWe/m**

$(0.1 \times 0.45 \times 0.90) \eta = 4 \%$

Eficiencia de transformación



Potencial Mundial de generación eléctrica a partir de recursos hidrotermales submarinos (ventilas hidrotermales)



Diseño de sistema para generación submarina a partir de ventilas hidrotermales (Hiriart *et al.*, 2010)

El diseño propuesto por Hiriart et al. (2010) consiste en el desarrollo de un submarino el cual cuenta con un intercambiador de calor, el cual es colocado justo encima de la ventilla hidrotermal (sin estar en contacto directo con la ventilla, evitando así cualquier interferencia con el habitat de la ventilla). En este intercambiador un fluido secundario (fluido de trabajo) será evaporado para así ser enviado a una turbina donde se generará electricidad. Por otra parte en el otro extremo del sistema se encuentra un condensador localizado a unos cuantos metros de la ventilla. Todo el equipo se encuentra encapsulado dentro de un submarino, dejando solo fuera el evaporador y el condensador. Estudios preliminares indican que es posible generar 25 MWe a partir de una ventilla con las condiciones apropiadas.

2. TÉCNICAS DE EXPLORACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS

En este apartado se mencionan las diferentes técnicas que se utilizan en las distintas fases de la exploración de recursos geotérmicos, agrupadas en los siguientes temas.

- Técnicas geológicas
- Técnicas geofísicas
- Técnicas geoquímicas
- Mediciones de temperatura, gradiente y flujo térmicos

El capítulo concluye con un programa general de exploración geotérmica que se propone como guía general para realizar la exploración de una zona geotérmica.

2.1. TÉCNICAS GEOLÓGICAS

La exploración, ya sea regional o de detalle¹, debe iniciar con una buena cartografía de la zona. Esta cartografía incluye información de la secuencia litológica y vulcanológica, información estructural (fallas y fracturas, campo de esfuerzos), información topográfica, información hidrotermal (manifestaciones superficiales, áreas de alteración), información radiométrica (emisión de radiación térmica del suelo), mapeo de emisión de gases del suelo (CO₂, H₂S, Hg; Rd, B). Con base en la cartografía, se pueden elaborar modelos geológicos preliminares del subsuelo, que sirvan de guía en los subsecuentes estados de la exploración.

Las herramientas disponibles en el mercado para llevar a cabo estas tareas incluyen lo siguiente:

- a) Imágenes de satélite y fotografía aérea.

Las imágenes de satélite y la fotografía aérea sirven para el mismo propósito. El uso de una u otra depende del área que se desee explorar y del costo. Una imagen de satélite es más barata y abarca grandes extensiones; mientras que la fotografía aérea es más cara, pero ofrece una mayor resolución y detalle. Estas imágenes, tanto satelitales como de avión, proporcionan información de la superficie de terreno. La resolución de una imagen tiene cuatro aspectos: espacial, espectral, radiométrica y temporal. La primera se refiere al tamaño de pixel de la imagen que representa al objeto o área mínima que puede ser observada; la segunda al rango de frecuencias discretas del espectro electromagnético que mide el sensor; la tercera, a los niveles de brillantez o

¹ La exploración regional involucra áreas del orden de 10 a 100 mil km², mientras que la de detalle abarca áreas del orden de 10 a 100 km².

escalas de grises que el sistema de detectores puede medir y por último, la cuarta se refiere a la periodicidad con que el satélite obtiene imágenes de un mismo sitio.

Los satélites que proporcionan estos servicios son: GeoEye, Digital Globe, Spot Image y EROS (*Earth Resources Observation Satellites*) y Landsat.

Las principales tecnologías de obtención de imágenes incluyen sensores multiespectrales, hiperspectrales, pancromáticos, tecnología LIDAR (*Light Detection And Ranging*) y ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometers*). Con estas tecnologías se obtienen imágenes en diferentes frecuencias del espectro electromagnético que combinadas entre sí, resaltan diferentes rasgos superficiales, como pueden ser fallas, alineamientos, zonas de alteración hidrotermal. Con esta información se pueden elaborar planos geológicos preliminares que sirvan de apoyo a la exploración sobre el terreno, así como modelos digitales de elevación. En particular la tecnología ASTER es útil para realizar mapeos de temperatura, emisividad y reflectancia. En algunas zonas se ha utilizado la tecnología hiperspectral (cobertura de un rango del espectro electromagnético con un número grande de bandas discretas) para detectar variaciones en la cobertura vegetal que pudieran relacionarse con sitios de descarga de gases de origen hidrotermal.

b) Sistemas de posicionamiento global (GPS)

Esta tecnología está ampliamente comercializada y su costo es muy accesible. Su utilidad estriba en posicionar de manera fácil y rápida los rasgos o sitios de interés, observados durante un levantamiento de terreno; así como elaborar planos topográficos de gran resolución. Esta información puede usarse de inmediato en la elaboración de cartografía con Sistemas de Información Geográfica (GIS)

c) Modelos digitales de elevación del terreno(MDE)

Estos modelos son útiles para la elaboración de mapas, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. Los modelos se construyen a partir de fotogrametría o de técnicas de percepción remota como LIDAR o ISAR (*Inverse Synthetic Aperture Radar*). En México el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) es el principal proveedor.

En geología estructural, los mapas altimétricos y de relieve sombreado (o iluminación artificial) son muy útiles para identificar fallas, alineamientos y diferentes formas o rasgos geológicos.

d) Mapeadores térmicos

Dentro de la variedad de sensores remotos, existe un grupo que detecta frecuencias del infrarrojo que incluyen la radiación térmica de objetos a temperaturas ambientales. Esta tecnología puede usarse para identificar anomalías térmicas en la superficie del terreno que pudieran estar asociadas a descargas de acuíferos hidrotermales. La información que se obtiene de las imágenes tiene que ser validada con observaciones y

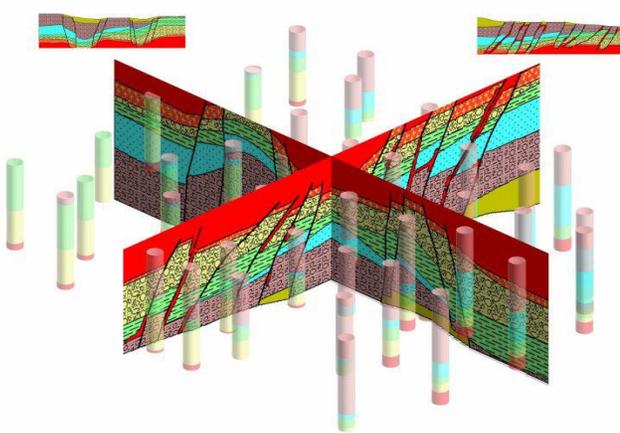
mediciones en el terreno, pues siempre existe cierta ambigüedad en la información de las imágenes. Por ejemplo, los cuerpos de agua superficial, debido a su gran reflectancia, pueden confundirse con puntos de radiación asociada a una temperatura anómala.

Una empresa rusa, cuyo nombre comercial es Geo Vision, ofrece una tecnología de percepción remota que combina la detección radiométrica con detección de radiación gamma del aire, para la identificación de zonas de interés geotérmico. La tecnología es novedosa, la empresa ofrece poca información del sustento científico de su tecnología; sin embargo puede ser una tecnología promisoría.

e) Detectores de gases

Esta tecnología se discutirá en el apartado de las tecnologías geoquímicas.

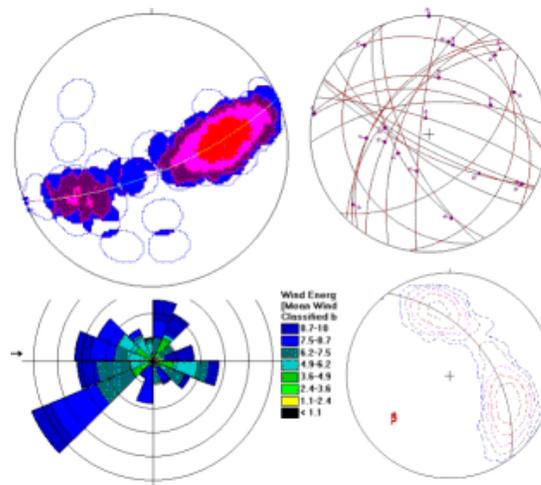
f) Modelado geológico



En el mercado existe una variedad de programas (software) destinados al modelado geológico. Uno de los más completos es la familia PETREL, comercializada por Schlumberger; aunque su precio es elevado. Otro paquete comercial es RockWorks, comercializado por Rockware, a un precio mucho más accesible.

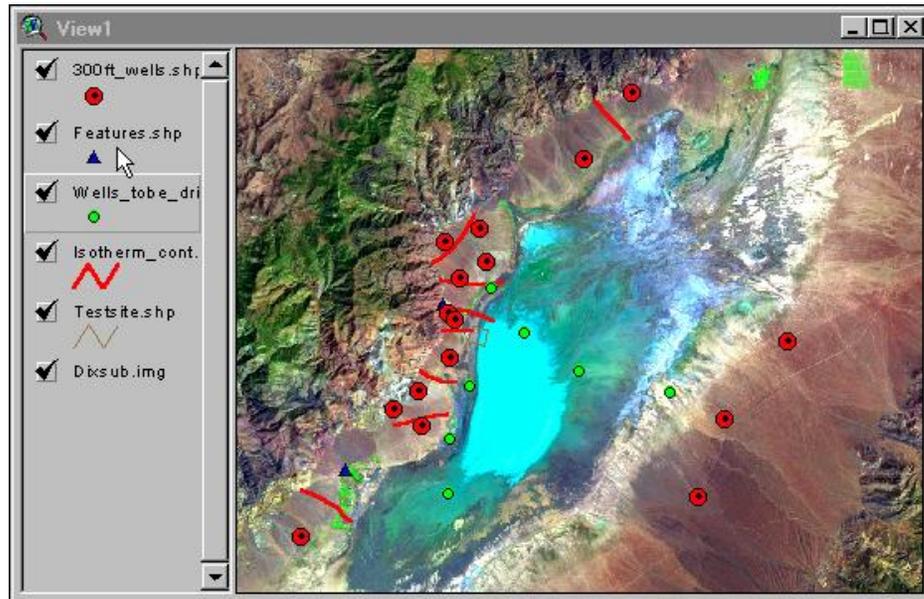
g) Modelado estructural

Para el análisis y modelado de datos estructurales existen dos paquetes; StereoNet y GeOrient; este último está más actualizado.



h) Sistemas de información geográfica

Estos sistemas son útiles para integrar una gran diversidad de información superficial referenciada, incluyendo fotografía aérea e imágenes de satélite. Con ellos se simplifica grandemente el trabajo cartográfico y el análisis geoestadístico. Es paquete comercial más utilizado es la familia de productos ESRI (ArcGIS).



2.2. TÉCNICAS GEOFÍSICAS

Como complemento y apoyo a la exploración geológica, se dispone de varias técnicas que miden alguna propiedad física del subsuelo, mediante sondeos realizados en la superficie del terreno o levantamientos aéreos; con los datos de campo se elaboran modelos uni, bi o tridimensionales de la distribución de dicha propiedad en el subsuelo. Posteriormente, se da una interpretación geológica al modelo geofísico.

Las propiedades de subsuelo sujetas a estos estudios son las siguientes:

- a) Propiedades eléctricas (métodos resistivos)
- b) Densidad de los cuerpos (gravimetría)
- c) Propiedades magnéticas (magnetometría)
- d) Propiedades sísmicas

Para ello se cuenta con las herramientas que se describen a continuación:

2.2.1. Métodos eléctricos

a) *Potencial espontáneo*

Vale la pena mencionar brevemente el método conocido como autopotencial, potencial espontáneo o polarización espontánea, que es un método pasivo, ya que registra una señal natural del terreno, no provocada deliberadamente. El trabajo de campo consiste en medir el potencial natural del terreno mediante un par de electrodos y un voltímetro. Aunque no existe una teoría satisfactoria que explique las variaciones naturales del potencial, éstas se atribuyen a fenómenos electroquímicos del subsuelo. La experiencia indica que los valores de potencial en zonas geotérmicas son relativamente grandes, debido, muy probablemente, al ‘halo’ de alteración de minerales arcillosos que sirve de capa al yacimiento geotérmico. Este método puede ser muy útil en las etapas tempranas de la exploración y prospección de campos geotérmicos, cuando se cuenta con recursos limitados de personal, dinero y equipo.

MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD (O CONDUCTIVIDAD) DEL TERRENO

La resistividad de la parte más superficial de la corteza terrestre varía enormemente de un lugar a otro, en un rango de 10^{11} ohm-m a 10^{-1} ohm-m. Las bajas resistividades están asociadas a la presencia de agua y de alteración hidrotermal y, en menor abundancia, a yacimientos metalíferos. La conductividad es el valor inverso de la resistividad; sus unidades son S/m (Siemens sobre metro).

La experiencia indica que existen anomalías de baja resistividad asociadas a los reservorios geotérmicos. Esto se debe al ‘halo’ de alteración de minerales arcillosos, que se produce en el techo de los yacimientos y en las zonas de descarga natural del fluido geotérmico.

Existen varias técnicas para medir la resistividad del subsuelo. Estas se pueden dividir en dos grandes grupos: métodos eléctricos y métodos electromagnéticos. En años recientes, estos últimos tienden a desplazar a los primeros, más tradicionales y menos desarrollados tecnológicamente. Los métodos electromagnéticos, a su vez, pueden ser activos (deliberadamente se introduce una perturbación en el terreno) o pasivos (se miden y registran señales que ocurren espontáneamente en el terreno).

b) *Sondeos eléctricos verticales (SEV)*

Entre los métodos eléctricos que más se han usado en prospección geotérmica son los sondeos eléctricos verticales (SEV), también conocidos como sondeos tipo Schlumberger. Se usa un par de electrodos para introducir una señal de corriente eléctrica variable de muy baja frecuencia, lo que permite considerarla de hecho como una corriente directa y despreciar los fenómenos de inducción magnética; y otro par de electrodos para medir las variaciones del voltaje producidas por la corriente. Esta señal de voltaje se traduce en una medición de la resistividad aparente del terreno, mediante el uso de las leyes de la electricidad. En el campo, normalmente se realizan series de sondeos a lo largo de líneas predeterminadas, en direcciones perpendiculares, abriendo sucesivamente el espacio entre los electrodos para ir logrando mayor penetración de la corriente en el subsuelo. Con los datos obtenidos se construyen

curvas de resistividad vs abertura de los electrodos. A continuación, mediante procedimientos matemáticos de inversión, se transforman las curvas de resistividad aparente vs abertura electródica, en curvas de resistividad vs profundidad. Por lo general, una vez que se tiene la curva de resistividad aparente del sondeo, se aplica la inversión de Occam, para obtener el perfil de resistividad en función de la profundidad. Este algoritmo de inversión se fundamenta en el criterio de obtener un modelo de capas que sea lo más simple y suave posible; sin que se introduzcan demasiadas capas o se pierdan rasgos importantes del sondeo. Además, no se requiere la propuesta de un modelo previo de capas para iniciar el algoritmo, como en otras técnicas, lo cual evita el introducir rasgos arbitrarios a la interpretación del sondeo. Con estas curvas se construyen secciones verticales de resistividad y planos de isovalores de resistividad a diferentes profundidades.

Después recurre a modelos bidimensionales o tridimensionales, mediante los cuales simula la resistividad real de las capas del subsuelo para obtener perfiles de resistividad aparente sintéticos, lo más similares posible a los obtenidos en campo. Este procesado de los datos de campo tiene dos limitantes: primero, el modelo de capas escogido debe ser un reflejo realista de la configuración del subsuelo; sin embargo, en las primeras etapas de la exploración normalmente no se tiene un conocimiento detallado del subsuelo, por carecer de perforaciones exploratorias. Segundo, aún teniendo un conocimiento razonable del subsuelo, existen múltiples ‘modelos’ que satisfacen el criterio de similitud con los datos obtenidos en campo, ya sea que se utilicen técnicas de inversión o modelado directo. Las técnicas de inversión consisten en establecer los parámetros de un modelo supuesto y, mediante un algoritmo, hacer variar sistemáticamente estos parámetros hasta obtener un buen ajuste entre los resultados del modelo y los datos observados. Por ello, es muy importante que la interpretación de los datos de resistividad vaya, todo el tiempo, de la mano del conocimiento que se tenga de la geología del subsuelo.

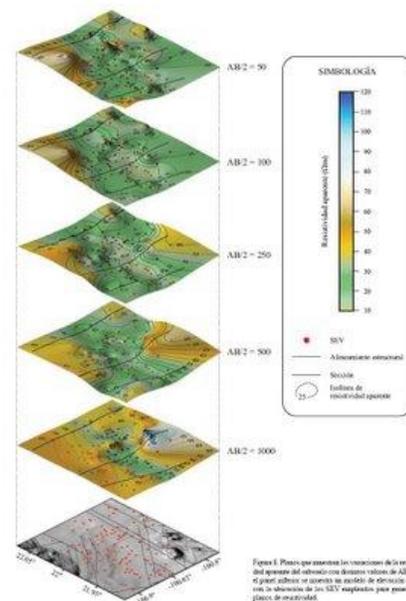


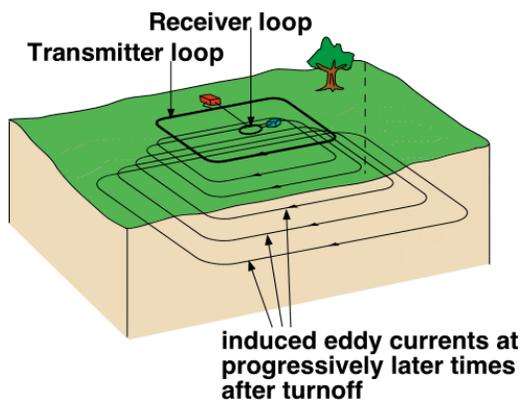
Figura 8. Planos que muestran las variaciones de la resistividad aparente del terreno con distintos valores de ABT. En el primer plano se muestra un modelo de observación digital con la ubicación de los SIV señalados para generar los planos de resistividad.

c) Sondeos dipolo-dipolo

Otro arreglo usado con frecuencia es el dipolo-dipolo. Los electrodos de corriente y los electrodos de medición del voltaje mantienen una misma abertura entre ellos y lo que varía es la distancia entre ambos pares de electrodos, en múltiplos de la separación entre electrodos, a lo largo de la línea de sondeo. Este arreglo es especialmente útil para detectar variaciones laterales de la resistividad. Además, la logística de campo es más sencilla, pues no se utilizan grandes longitudes de cable, como en los sondeos eléctricos verticales. El procesado de la información obtenida, es similar al del caso anterior.

d) *Sondeos transitorios electromagnéticos (TEM)*

El sondeo TEM, se basa en las leyes de la inducción electromagnética. Conforme a estas leyes, una corriente eléctrica variable induce un campo magnético y, viceversa, un campo magnético variable, induce una corriente eléctrica. El arreglo de un sondeo TEM consiste en un cable que forma un 'rizo' (loop), que se tiende sobre el terreno, por el que se hace pasar un pulso de corriente eléctrica, el cual genera un campo electromagnético primario. Al momento de interrumpir el pulso, se generan corrientes eléctricas de inducción secundarias en el subsuelo, junto con su campo magnético asociado. Mediante una bobina receptora, que previamente se instaló en medio o al lado del rizo, se detecta el decaimiento del campo magnético secundario.



Las corrientes y campo magnético secundarios decaen en fracciones de segundo, debido su difusión a través de la formación. La tasa de difusión y, por ende, la curva de decaimiento contra el tiempo, dependen, entre otras cosas, de la resistividad de la formación. Con la curva de decaimiento del campo magnético vs el tiempo, aplicando las leyes de la inducción y técnicas matemáticas de inversión, se obtienen curvas de resistividad vs profundidad. A este procedimiento se le conoce como cambio del dominio del tiempo a dominio de la profundidad.

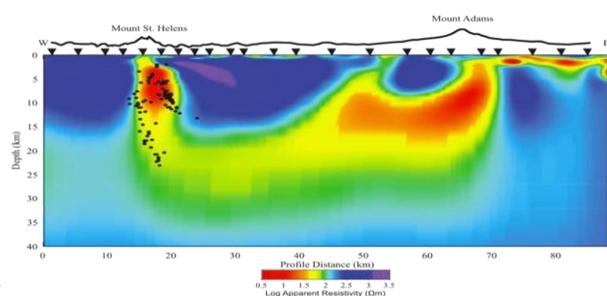
Las ventajas del sondeo TEM con respecto al sondeo eléctrico tradicional, son varias. Entre ellas:

- El operativo de campo es más sencillo. La amplitud del 'rizo' es mucho menor que la profundidad que se desea alcanzar.
- Por lo mismo, es posible tener una mejor resolución lateral de los cambios de resistividad; lo cual es importante en la prospección geotérmica.
- No se tienen problemas cuando la superficie del terreno es resistiva, ya que la corriente eléctrica a profundidad es inducida.

De manera similar al caso de los sondeos eléctricos, con las curvas de resistividad vs profundidad se construyen secciones verticales de resistividad aparente. También se puede recurrir al modelado bidimensional y tridimensional.

e) *Sondeos audiomagnetotelúricos (AMT) y magnetotelúricos (MT)*

El método combinado audiomagnetotelúrico (AMT) y magnetotelúrico (MT) consiste en medir los campos electromagnéticos (EM) naturales, de frecuencias diferentes, en la superficie del terreno. Estos campos son



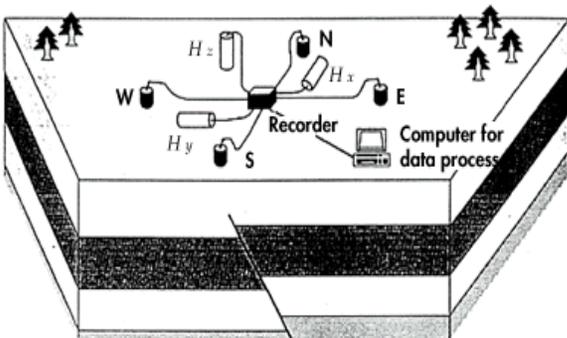
generados por corrientes naturales que circulan por el subsuelo. El objeto de estos estudios es conocer la estructura eléctrica del subsuelo.

Es un método pasivo, ya que las señales electromagnéticas no se inducen de manera deliberada. El espectro de frecuencias medidas va de 1×10^4 a 1×10^{-2} Hz. Las frecuencias mayores circulan cercanas a la superficie (< 2 km) y las menores a mayor profundidad (2 a 10 km o más).

En cada sondeo se miden las componentes horizontales (x, y) de los campos eléctrico y magnético, así como la componente vertical del campo magnético. El equipo de campo consiste de magnetómetros con el rango de frecuencia requerido por el estudio y pares de electrodos para registrar el campo eléctrico, colocados en el sitio con un arreglo adecuado, además de amplificadores y filtros de señal, registradores digitales y equipo de procesado. El registro de la señal en cada sondeo, debido a la baja intensidad de los campos EM y a la interferencia de ruido natural y antropogénico, es tedioso y requiere de 12 a 24 horas o más. El procesado se realiza en dominio de frecuencia y no de tiempo, porque la teoría es más sencilla en el primer caso.

Las variaciones de los campos eléctricos y magnéticos se relacionan mediante el tensor de impedancia. Este tensor constituye la respuesta del medio y de él se obtiene la resistividad de subsuelo y las diferencias de fase entre ambos campos, a diferentes frecuencias. Cuando la estructura eléctrica del subsuelo es simple (un medio estratificado), el vector de impedancia se reduce a una sola componente; a mayor complejidad, por ejemplo un medio bidimensional (una estructura regional con orientación preferente, como una falla), el tensor tiene dos componentes. Con la ayuda de procedimientos matemáticos de inversión y modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales (aunque estos últimos por su complejidad son menos confiables), se obtiene la resistividad del subsuelo a diferentes profundidades. Estos modelos deben ser congruentes con el conocimiento que se tenga de la geología del subsuelo.

Adicionalmente, con la componente vertical del campo magnético se puede obtener otro parámetro independiente, conocido como "tipper". La magnitud del tipper se relaciona con la complejidad de la estructura eléctrica del subsuelo. Cuando su valor es cero, estamos en presencia de un medio eléctrico unidimensional; mientras mayor sea su valor, mayor es la complejidad del medio.



Los métodos TEM y MT reutilizan con la misma finalidad de obtener la estructura eléctrica del subsuelo. Probablemente el MT sea preferible, por su capacidad de penetración, por la facilidad de la logística en lugares remotos y de difícil acceso y, sobre todo, si se desean mediciones tensoriales para un mejor y más detallado modelado. El método TEM debe elegirse cuando el costo del MT sea inaceptable, sobre todo en casos en que se desean

mediciones escalares en una zona amplia; así como en el caso en que el ruido antropogénico haga imposible el registro de las señales MT.

f) Sondeos audiomagnetoteléuticos de fuente controlada (CSAMT)

g) Tomografía eléctrica

Una tomografía eléctrica consiste en la obtención de imágenes detalladas de la estructura eléctrica del subsuelo. Para ello, se utiliza un arreglo de electrodos en forma de dipolos, los cuales se tienden sobre el terreno o se introducen en pozos, y mediante los cuales se mide el potencial eléctrico. Los datos obtenidos se procesan mediante técnicas de inversión para obtener las imágenes deseadas. Para llegar a ello, se requiere una gran densidad de sondeos en el área que se desea prospectar, lo cual supone un costo elevado.

2.2.2. Métodos gravimétricos

La prospección gravimétrica se fundamenta en la observación experimental de que la intensidad del campo gravitacional de la superficie terrestre 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:

$$g = G * \frac{M_t}{R_t^2}$$

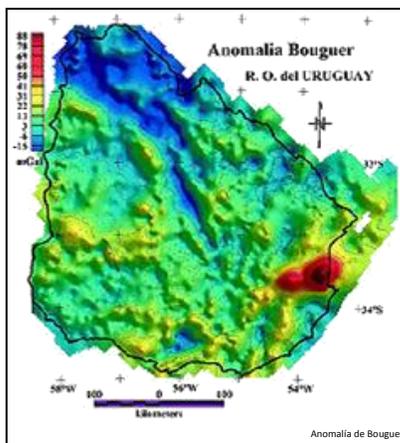
donde G es la constante de gravitación, M_t la masa de la Tierra y R_t , su radio. A nivel del mar, en el ecuador, tiene un valor de $9,780326771 \text{ m/s}^2$, según el World Geodetic System 1984 (WGS-84).

En la práctica, se utiliza el sistema cgs, debido a que las anomalías gravimétricas son pequeñas. Por definición un ‘gal’ es igual a una aceleración de 1 cm/s^2 . Las anomalías tienen, por lo general, valores del orden de miligales.

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 el ‘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 un aparte, 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.

Los estudios de detalle se llevan a cabo con gravímetros portátiles, haciendo lecturas en estaciones predeterminadas, a lo largo de ciertas trayectorias. En estos casos, es indispensable el realizar un levantamiento topográfico de precisión de manera simultánea, para poder corregir los valores de gravedad leídos, a un mismo nivel de referencia, como se verá a continuación. Cuando el estudio es de carácter regional, los levantamientos se hacen con equipo instalado en una aeronave. Los gravímetros miden la componente vertical de la intensidad del campo gravitacional.

Los datos de campo, para poder ser interpretados, deben corregirse de tal manera que los valores de gravedad tengan una referencia normalizada. De otra manera, alguno o varios de estos efectos pueden ser dominantes e impedir que las anomalías puedan ser observadas. Estas correcciones son: a) latitud, b) altitud, c) Efecto Bouger, d) efecto topográfico y e) mareas gravitacionales. Una vez realizadas estas correcciones a los datos de campo, se elabora el plano de anomalía de Bouger, que es la base para el modelado e interpretaciones. Los procedimientos para estas correcciones y la elaboración del plano están bien establecidos y existen programas comerciales para estos procesados. Lo más conveniente es solicitar al contratista que entregue el estudio con estas correcciones.



El modelado de las anomalías gravimétricas no tiene una solución única. Por ello, un buen modelado gravimétrico dependerá del conocimiento geológico que se tenga de la zona de estudio. El primer paso en el modelado es la obtención de la anomalía de Bouger residual. Las observaciones de campo indican que existe una cierta correlación directa entre la magnitud y la amplitud espacial de una anomalía gravimétrica. Esto implica que, si deseamos determinar la naturaleza de una anomalía local, es necesario primero restar el efecto de la anomalía regional en la que se encuentra inmersa. El procedimiento impone un reto al explorador, pues debe definir qué entiende por regional y qué, por local; es decir, la escala del problema. Aquí,

también, un conocimiento adecuado de la geología es de gran importancia. Una vez conceptualizado el modelo, se pueden aplicar diversos métodos numéricos para restar la anomalía regional.

Como última etapa, se llevará a cabo 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.

Al final, lo que se obtiene del modelado es una imagen estructural del subsuelo, a saber, fallas y contactos litológicos existentes entre diferentes cuerpos.

2.2.3. 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 ‘geodinamo 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, la corriente de anillo y la magnetopausa.

La contribución de la corteza es importante en el contexto de la exploración de recursos naturales, como la energía geotérmica. Esta contribución se 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, la 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 en que la roca fundida se cristalizaba; su orientación depende, desde luego, de la orientación del campo principal al momento de la cristalización.

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 (nanotesla), 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.

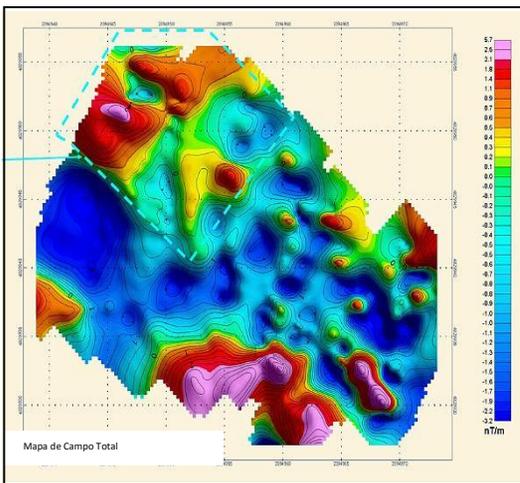
La polaridad del campo magnético también presenta inversiones, en periodos que varían de miles a millones de años. Actualmente el polo norte magnético casi coincide con el polo norte geográfico, con una desviación del orden de 11° .

En la prospección geofísica se mide el campo magnético total de la superficie terrestre, ya sea mediante estaciones terrestres o mediante vuelos. Los levantamientos aéreos tienen la ventaja de reducir la influencia de las anomalías superficiales. Ahora bien, en el caso en que las anomalías magnéticas son pequeñas en comparación con el campo magnético de la Tierra, el campo total de la anomalía es casi igual a la componente de dicha anomalía en la dirección del campo terrestre.

En los levantamientos se utiliza un magnetómetro; los actuales se basan en el fenómeno de la precesión protónica. La unidad del Sistema Internacional para medir la intensidad del campo magnético es el Tesla. Un magnetómetro tiene una sensibilidad del orden de 0,1 a 1 nanotesla. En el pasado se usaba con frecuencia la unidad ‘gama’ que es equivalente a un nanotesla.

En los levantamientos terrestres es importante definir el intervalo entre estaciones, en función del detalle que se desea obtener. Por otra parte, tanto en los levantamientos terrestres como en los aéreos, si la duración es larga, es necesario corregir la variación temporal del campo. Lo más sencillo es mantener un magnetómetro fijo en una estación base que registre las variaciones temporales, las cuales se deberán sustraer a las registradas en las estaciones de observación. Si se dispone de un solo aparato, es necesario realizar mediciones periódicas en la estación base, en intervalos que sean congruentes con la magnitud de las anomalías que se desea observar y de las variaciones temporales.

Los campos magnéticos y gravimétricos se conocen como campos potenciales pues comparten ciertas propiedades físicas que los hacen conservadores. Gracias a esta semejanza, mediante ciertas técnicas matemáticas es posible reducir las anomalías magnéticas bipolares a monopulares; este procedimiento se conoce como reducción al polo. Así, las anomalías magnéticas se hacen semejantes a las anomalías gravimétricas y, se pueden utilizar las mismas herramientas matemáticas en ambos casos.



Una vez que se tiene el plano de intensidad de campo total, se pueden realizar una serie de tratamientos matemáticos, semejantes a los aplicados a la anomalía de Bouger. Finalmente, se procede al modelado numérico, con las mismas reservas que en el caso de la gravimetría.

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

2.2.4. Métodos sismológicos

La prospección sismológica 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. En geotermia, este tipo de prospección se ha usado poco, por su costo y porque en ambientes volcánicos no existen horizontes reflectores bien definidos. Sin embargo, en los últimos años se han mejorado las técnicas de interpretación en ambientes volcánicos.

El tipo de prospección que se utiliza en geotermia es el registro de la microsismicidad natural del terreno, conocida como sísmica pasiva.

a) *Microsísmica pasiva*

Los sismos son producidos por el paso de ondas elásticas a través de las rocas de la Tierra. Estas ondas se originan por la liberación repentina de energía en el subsuelo, ya sea por el esfuerzo de una deformación liberado súbitamente, por una intrusión magmática, por colapso de una estructura geológica, etc.

Las ondas sísmicas se dividen en dos grupos: las que se propagan a través de la masa de las rocas y las que viajan por la superficie. Estas últimas no son útiles en la prospección de recursos naturales; sin embargo, su estudio es importante pues son las causantes principales de las sacudidas de las estructuras construidas por el hombre.

Las ondas que viajan por la masa de la roca se dividen, a su vez, en ondas primarias (P) y secundarias (S). Las ondas P son ondas compresivas, similares a las ondas de sonido, en las que el movimiento oscilatorio de las partículas es en la misma dirección que la propagación de la onda. En las ondas S la dirección del movimiento oscilatorio de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las ondas P viajan a mayor velocidad que las S y, en fluidos, las ondas S no se pueden propagar.

La velocidad de propagación de la onda sísmica depende de las propiedades mecánicas de la roca como, compresibilidad, rigidez, densidad, etc. Cuando la onda encuentra una interfase entre rocas con diferentes propiedades se refleja y refracta, de una manera que puede ser complicada. Una onda P incidente puede dar lugar a ondas P y S reflejadas y refractadas; las ondas S incidentes pueden dar lugar a fenómenos semejantes.

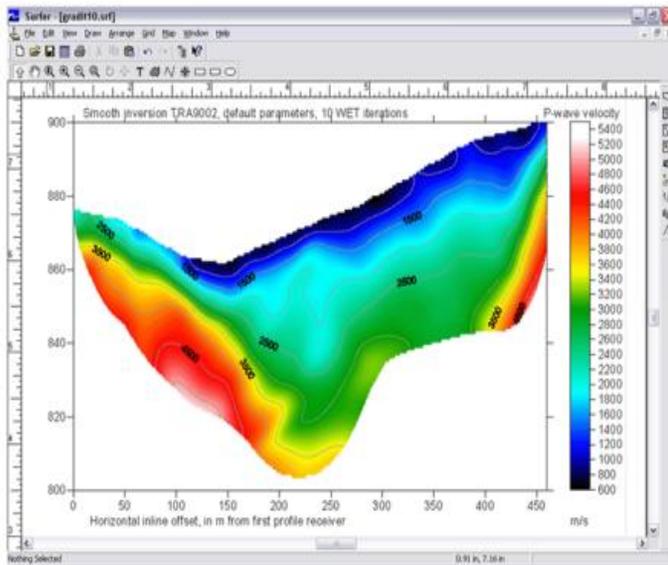
La actividad sísmica se registra mediante sismómetros y sismógrafos. Los equipos digitales de tres componentes (x,y,z) son los más adecuados para estudios exploratorios. Los sensores pueden medir la velocidad del movimiento del terreno o la aceleración. Estos últimos son mejores pues pueden registrar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

La actividad sísmica se mide en escalas de intensidad y de magnitud. Las escalas de intensidad se refieren a los daños causados por un sismo y no se basan en algoritmos cuantitativos. La más conocida es la de Mercalli. La magnitud, en cambio, es proporcional a la cantidad de energía liberada por un sismo. La escala más conocida es la de Richter, que consiste en una escala logarítmica que mide la máxima amplitud de onda registrada en un sismógrafo estandar a una distancia de 100 km del epicentro. Mediante fórmulas empíricas se corrige la amplitud medida a diferentes distancias de epicentro.

En los estudios de microsismicidad es necesario instalar una red local con, al menos, unas seis estaciones. Para ubicar un sismo con suficiente exactitud es necesario que se registre en, al menos, tres estaciones y que el epicentro se localice dentro del perímetro cubierto por la red.

Cuando se dispone de suficiente información de calidad, es posible interpretar el mecanismo focal que produjo el sismo e inferir la geometría del plano de falla, con base en la distribución de la dirección de llegada de las ondas P a la superficie del terreno.

b) Sísmica activa de reflexión y refracción



Cuando se cuenta con un historial de microsismos es posible obtener un modelo tridimensional detallado de distribución de velocidades de propagación de la onda en las rocas objeto del estudio. A su vez, este modelo de velocidades debe guardar cierta relación con la estructura geométrica de subsuelo y las propiedades físicas de las rocas. Este tipo de análisis se conoce como tomografía sísmica. Con esta técnica es posible conocer mejor la estructura tridimensional de un yacimiento geotérmico e, incluso, determinar los cambios producidos por la explotación.

Existen pocos ejemplos de aplicación de esta técnica a casos concretos pues, aunque la técnica no es cara, requiere de un gran número de sismos registrados y de gran calidad en los registros. Esto significa que se requiere un tiempo largo de medición, más de dos años, lo que puede resultar impráctico dentro de los programas de exploración.

2.3. TÉCNICAS GEOQUÍMICAS

Una vertiente de la exploración geoquímica es la identificación de estructuras activas por las que se emiten diferentes gases a la atmósfera, que pudieran indicar la presencia de actividad hidrotermal a profundidad. Otra vertiente es el uso de la composición química e isotópica de las manifestaciones termales para conocer el origen de los fluidos, inferir temperaturas a profundidad, determinar el potencial corrosivo o incrustante de los fluidos, establecer la relación de los fluidos hidrotermales con la hidrología y geohidrología de la zona. Las herramientas disponibles son las siguientes:

2.3.1. Detección de elementos traza y gases del suelo

No existe consenso en cuanto a la utilidad de las mediciones de algún gas o elemento traza en el suelo. Estas técnicas de prospección se fundamentan en el supuesto de que, a través de fallas y fracturas, se descargan algunos elementos traza como el Hg y estos se fijan en el suelo; o pueden ser gases, como el ^{222}Rn , cuya vida media es de 3.824 días y emite partículas alfa al decaer. Otro tipo de gases que pueden monitorearse son el CO_2 , H_2S , B, CH_4 . Estas técnicas pueden ser útiles en las etapas tempranas de la exploración geotérmica, cuando se busca ubicar zonas específicas en una región relativamente grande (varias decenas o cientos de km^2). Existe equipo comercial para realizar estas mediciones.

2.3.2. Muestreo y análisis químico de agua y gases

El trabajo del geoquímico consiste en tomar muestras de agua y vapor y del material de alteración, para su análisis en laboratorio y posterior interpretación. Las muestras se usarán para análisis químicos de elementos mayores y menores, así como de isótopos ambientales. A las muestras de material de alteración se le practican análisis químicos y mineralógicos (difracción de rayos x).

PROCEDIMIENTO PARA EL MUESTREO DE MANANTIALES Y POZOS DE AGUA

1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE MUESTREO

- a) Nombre del manantial o pozo y un número de identificación
- b) Coordenadas geográficas
- c) Fecha del muestreo
- d) Tipo de suelo o roca en el que emerge el manantial; mencionar si hay presencia de alteración o depósitos hidrotermales.
- e) Medir temperatura, conductividad eléctrica, pH y alcalinidad en sitio
- f) Estimar el caudal

2. TOMA DE LAS MUESTRAS

Las botellas para el muestreo deben ser de polietileno de alta densidad con tapa y contratapa. En cada sitio llenar 4 botellas de 250 ml cada una; y una botella de 100 ml para SiO₂. Etiquetar cada botella con su número de identificación, la fecha e indicar para qué tipo de análisis se usará.

Dos botellas de 250 ml acidificarlas con unas pocas gotas de ácido nítrico puro concentrado para determinación de cationes. Las otras dos no llevan ningún aditivo y son para la determinación de aniones y los otros parámetros, excepto SiO₂.

Enjuagar las botellas de 250 ml y de 100 ml con el agua del manantial pozos y después llenarlas hasta el tope. Cerrarlas con tapa y contratapa.

La botella de 100 ml para SiO₂ debe ser una muestra diluida: tomar 80 ml de agua deionizada y 20 ml de agua del manantial o pozo. Antes, enjuagar también la botella con agua del manantial.

DETERMINACIONES OBLIGATORIAS DE LABORATORIO

CATIONES: Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺.

ANIONES: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- (y CO_3^{2-} si procede)

SiO_2

OTROS: pH, conductividad eléctrica (CE) de laboratorio

DETERMINACIONES RECOMENDABLES

CATIONES: Li^+ , Rb^+ , Cs^+ , As (total), NH_4^+

ANIONES: F^-

B, H_2S

PROCEDIMIENTO PARA EL MUESTREO DE GASES EN FUMAROLAS Y MANANTIALES HIRVIENTES

El muestreo de gases requiere de dispositivos especiales y una cierta experiencia.

En la prospección de recursos geotérmicos no es necesario el muestreo de fumarolas de origen volcánico, cuyas temperaturas exceden los 120°C , y que son más complicadas de muestrear.

2.3.3. Muestreo y análisis isotópico de agua y gases

El muestreo de agua y gases para análisis isotópico es muy similar al muestreo para análisis químicos. Los detalles de los procedimientos se pueden consultar en: Sampling Procedures for Isotope Hydrology, Isotope Hydrology Section, International Atomic Energy Agency, Vienna. (www.iaea.org; ih@iaea.org).

Los isótopos son átomos de un mismo elemento químico, por lo que tienen igual número de protones (número atómico). Sin embargo, el número de neutrones es distinto, por lo que la masa atómica, igual a la suma de protones y neutrones, es diferente. Por ejemplo, el hidrógeno tiene tres isótopos, los cuales se representan con el símbolo químico respectivo (H) y un índice superior izquierdo que indica la masa: ^1H , ^2H y ^3H . El hidrógeno uno, el más abundante, consta de un protón; el hidrógeno dos, de un protón y un neutrón y el hidrógeno tres, de un protón y dos neutrones.

Algunos de los isótopos de los elementos ligeros, es decir con números atómicos pequeños, son estables, por lo que siempre permanecen con la configuración atómica que les es propia. Tal es el caso del ^1H y del ^2H ; este último conocido también como deuterio (D). Otros, como el ^3H , conocido también como tritio (T), son inestables. Esto significa que su configuración atómica no puede permanecer y decaen, transformándose en otra configuración distinta. Al hacerlo, emiten radiación, que puede ser de tres tipos diferentes: partículas alfa (dos protones y dos neutrones), beta (un electrón o un positrón) o gama (un fotón). Por ejemplo el T emite una partícula beta negativa y se transforma en ^3He . Nosotros trataremos aquí únicamente de ciertos

isótopos estables: del Hidrógeno (H, D), Helio (^3He , ^4He), Oxígeno (^{16}O , ^{18}O), Carbono (^{12}C , ^{13}C) y Azufre (^{32}S , ^{34}S).

Estos isótopos comparten ciertas propiedades, entre otras: son elementos ligeros, abundan en la naturaleza y su movilidad es grande, pues participan en muchas reacciones y cambios de fase. Esto los hace muy útiles como trazadores de los procesos naturales.

Las propiedades fisicoquímicas de los isótopos de un mismo elemento son muy semejantes, ya que la configuración electrónica de las moléculas es la misma. Sin embargo, debido a la diferencia de masa atómica, la energía vibracional de las moléculas es un poco diferente para cada isótopo, siendo ligeramente mayor para el isótopo de menor masa, por ejemplo, el ^{16}O posee una energía vibracional mayor que el ^{18}O . Como consecuencia, las propiedades fisicoquímicas varían ligeramente entre los isótopos de un mismo elemento. Así, la presión de vapor del D y del ^{18}O es algo menor que la del H y del ^{16}O ; por lo que, durante el proceso de evaporación, los isótopos ligeros (H y ^{16}O) cambian a la fase vapor con una tasa proporcionalmente mayor que la de los isótopos pesados (D y ^{18}O), dando por resultado que, en la fase vapor, habrá una proporción mayor de isótopos ligeros que en la fase líquida remanente. A este fenómeno se le conoce como ‘fraccionamiento isotópico’.

Los cambios de fase, las reacciones de precipitación y disolución (que son reacciones de intercambio molecular) y las de oxidación y reducción, son los principales procesos naturales en los que ocurre el fraccionamiento isotópico. Esto es, la proporción original de isótopos ligeros y pesados de un mismo elemento varía en los productos resultantes del proceso, ya sea que se incremente la proporción de isótopo pesado o la del ligero.

Debido al fraccionamiento isotópico, la abundancia natural de los isótopos estables ligeros varía en los materiales de la corteza terrestre, en el agua y en el aire.

La composición isotópica de una muestra se expresa en unidades “delta por mil” ($\delta\text{‰}$), que representa el mayor o menor contenido del isótopo pesado con respecto a un patrón universal de referencia.

La composición isotópica del agua nos da información acerca de su origen y de su historia en el ciclo hidrológico. Las aguas geotérmicas asociadas a cuerpos magmáticos poseen una composición isotópica que las caracteriza.

2.3.4. Interpretación de los resultados y diagramas geoquímicos

Generalmente los yacimientos geotérmicos no son sistemas cerrados, por lo que existen descargas superficiales en forma de manantiales, fumarolas, pozas ácidas o suelos vaporizantes.

Se suele catalogar a los manantiales como: templados, calientes e hirvientes.

Los manantiales templados son aquellos cuya temperatura no excede de 45 C. La concentración de sales es baja y el tipo es bicarbonatado. Estos manantiales están asociados a

sistemas termales de temperaturas bajas o moderadas y que no están relacionados con intrusiones magmáticas. Los manantiales calientes presentan temperaturas superiores 45°C e inferiores al punto de ebullición correspondiente al lugar. La salinidad y la composición química de estos manantiales es muy variable y depende del tipo de sistema hidrotermal al que están asociados.

Los manantiales hirvientes, en la mayoría de los casos, están asociados a sistemas hidrotermales magmáticos de alta temperatura. Estos manantiales son, por regla general, del tipo clorurado sódico, con concentraciones altas de potasio, bajas concentraciones de calcio y muy bajas de magnesio. El pH es neutro o ligeramente alcalino. Estos manantiales son descargas líquidas de los reservorios y, por ello, se localizan en las partes bajas de los campos geotérmicos.

Los géiseres son un caso peculiar de manantiales hirvientes. Se caracterizan por lanzar un chorro de agua y vapor a intervalos regulares. La altura del chorro varía de unos decímetros a decenas de metros y el intervalo puede ser de unos minutos a varias horas.

Las fumarolas son descargas de vapor saturado o ligeramente sobrecalentado. Se localizan en las partes altas de los campos geotérmicos. Estas descargas tienen una presión algo mayor que la atmosférica, de tal forma que emiten un “chiflido” y lanzan un chorro de vapor apreciable, aunque sea pequeño. Las fumarolas volcánicas, en comparación con las geotérmicas, presentan temperaturas más altas y presencia de SO₂, HCl y HF.

En ocasiones, las fumarolas descargan a través de suelo saturado de agua, dando lugar a la formación de pozas ácidas con lodo. Esto se debe a que parte del H₂S se disuelve en el agua y, mediante la acción catalizadora de bacterias, se oxida como H₂SO₄, que es un ácido fuerte. Al reaccionar este fluido ácido con la roca, la altera y se obtiene caolinita y otras arcillas similares, que dan la apariencia lodosa a estas charcas. Como resultado de la disociación del ácido sulfúrico, el pH es muy bajo, lo que significa una alta concentración de H⁺ y, por otra parte, el anión predominante es el SO₄²⁻.

Cuando una fumarola es rica en H₂S y, como consecuencia, se deposita azufre elemental en su alrededor, se le conoce como ‘solfatará’. Si abunda en CO₂, se le llama ‘mofeta’.

Los suelos vaporizantes, que no deben confundirse con las fumarolas, son descargas difusas de vapor, sin presión y en áreas amplias. Por lo general, se trata de descargas secundarias de un reservorio geotérmico. El calor de éste se transporta, de manera conductiva, hacia el suelo saturado de humedad, produciendo la vaporización.

La alteración hidrotermal de tipo argilítico, que es la característica en las zonas de descarga de vapor geotérmico, puede representarse de manera general por la siguiente reacción:

Roca (base) + fluido geotérmico (ácido) ↔ sales disueltas + sílice disuelta + minerales argilíticos de alteración (caolinita).

La información que se obtiene de los datos de laboratorio se procesa e interpreta, utilizando diversos diagramas. Una amplia descripción de estos diagramas se encuentra en: Arnórsson,

Stefán, 2000; *Isotopic and Chemical Techniques in Geothermal Exploration, Development and Use*, International Atomic Energy Agency, Vienna. Existen dos hojas de cálculo en formato Excel, una para agua y otra para gases, muy útiles para el procesado de la información y la elaboración de estos diagramas. Los autores las distribuyes gratuitamente. (Contactar a Tom Powell al correo tom.powell@mightyriver.co.nz).

En la interpretación de los datos químicos es muy importante contar con un modelo conceptual de la geohidrología de la zona, aunque sea preliminar. De otra manera, los datos de cada manifestación individual quedan como información puntual y no relacionada entre sí.

2.3.5. Geotermometría química e isotópica

La composición química de los manantiales termales puede ser útil para estimar la temperatura del reservorio del que son descarga. La temperatura se calcula con fórmulas, llamadas geotermómetros, en parte empíricas, en parte basadas en la teoría de equilibrio químico. El principio general en que se basan los geotermómetros es el supuesto de que, en las condiciones de temperatura del reservorio, los solutos que intervienen en la fórmula están en equilibrio químico entre sí. Una vez que el agua de reservorio escapa y asciende a la superficie, va enfriándose paulatinamente, ya sea por dilución, por conducción o por ebullición. Conforme baja la temperatura la cinética del reequilibrio se hace cada vez más lenta y, por ende, el agua del manantial mantiene la señal química de la temperatura original del reservorio o con una modificación pequeña. Para que un geotermómetro funcione, se requiere que el tiempo de reequilibrio sea, por lo menos, un orden de magnitud menor que el tiempo de ascenso del agua.

Ahora bien, es importante saber en qué condiciones se puede hacer uso de estos geotermómetros. La primera condición es que se apliquen a manantiales del tipo clorurado sódico y de alta temperatura (mayor a 80 C, aunque esto no debe tomarse como una regla inflexible), de tal manera que el manantial realmente represente una descarga de la fase líquida del reservorio y que no se haya diluido mucho en su ascenso a la superficie. Con menos confiabilidad, pueden aplicarse a manantiales clorurado sulfatados, teniendo en cuenta las condiciones geohidrológicas del manantial. Nunca debe aplicarse a manantiales bicarbonatados o a charcas ácidas, pues las temperaturas que se obtengan serán números sin ningún significado real.

A continuación, se muestran los geotermómetros más comúnmente usados en la etapa de exploración.

Geotermómetros basados en la sílice disuelta

En todas estas fórmulas, c representa la concentración de sílice disuelta en mg/l. Las fórmulas varían en función de la fase sólida de la sílice que controla la solubilidad. La fórmula con pérdida máxima de vapor se debe aplicar en los casos de manantiales hirvientes. Todas estas fórmulas han probado ser confiables y útiles. Cabe aclarar que estos geotermómetros son sensibles a los efectos de dilución, ya que el cálculo se basa en la concentración de una sola especie.

$$\text{Calcedonia (Fournier): } t(C) = \frac{1032}{4.69 - \log c} - 273$$

$$\text{Cuarzo (Fournier): } t(C) = \frac{1309}{5.19 - \log c} - 273$$

$$\text{Cuarzo con pérdida máxima de vapor (Fournier): } t(C) = \frac{1522}{5.75 - \log c} - 273$$

$$\text{Calcedonia-Cuarzo (Giggenbach): } t(C) = \frac{1000}{4.55 - \log c} - 273$$

Geotermómetros de cationes

Existe también una familia de geotermómetros basados en la concentración de los cationes principales (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}). En estos casos se emplea la razón de dos de éstos cationes, por lo que son menos sensibles a los efectos de dilución. En todos los casos la concentración está dada en mg/l. El geotermómetro que incluye al calcio es un poco más complicado, por causa del parámetro β que adquiere dos valores distintos; ésta fórmula es útil en casos en que el calcio es relativamente alto, digamos que más de un 25% de la concentración de potasio.

$$\text{Potasio-Magnesio (Giggenbach): } t(C) = \frac{4410}{13.95 - \log \frac{K^2}{Mg}} - 273$$

$$\text{Potasio-Sodio (Giggenbach): } t(C) = \frac{1390}{1.75 - \log \frac{K}{Na}} - 273$$

$$\text{Sodio-Potasio (Fournier): } t(C) = \frac{1217}{\log \frac{Na}{K} + 1.483} - 273$$

$$\text{Sodio-Potasio-Calcio: } t(C) = \frac{1647}{\log \frac{Na}{K} + \beta \left[\log \frac{\sqrt{Ca}}{Na} + 2.06 \right] + 2.47} - 273$$

$$\beta = \frac{4}{3} \quad \text{si} \quad \left[\log \frac{\sqrt{Ca}}{Na} + 2.06 \right] \geq 0 \quad \text{y} \quad t(C) \leq 100$$

$$\beta = \frac{1}{3} \quad \text{si} \quad \left[\log \frac{\sqrt{Ca}}{Na} + 2.06 \right] < 0 \quad \text{o} \quad \text{si} \quad t\left(\frac{4}{3}\right) > 100$$

Existe un diagrama triangular, propuesto por Giggenbach, que combina los geotermómetros de K/Na y de K/Mg, que permite clasificar las aguas y extrapolar la probable temperatura de reservorio, de una manera sencilla y directa. Este diagrama está incluido en la Hoja de cálculo mencionada en el apartado anterior.

Geotermómetros de gases

La composición química de los gases también puede ser útil para estimar la temperatura del probable reservorio. El equilibrio químico de los gases depende no solo de la temperatura, sino también de su distribución entre las fases líquida y gaseosa, por lo que es necesario conocer la saturación de vapor en el yacimiento. Esto hace de la geotermometría de gases una técnica más compleja. Existen varios diagramas mediante los cuales se estima la temperatura y la saturación del yacimiento. Algunos de estos diagramas están incluidos en la Hoja de cálculo mencionada en el apartado anterior.

Existen algunos geotermómetros de gases que, mediante ciertas consideraciones y ajustes empíricos, suprimen la necesidad de conocer la saturación de vapor. A continuación se muestran algunas fórmulas de estos geotermómetros.

D'Amore y Panichi:

$$t(C) = \frac{24775}{\alpha + \beta + 36.05} - 273 \quad \text{donde:}$$

$$\alpha = 2 \log \frac{CH_4}{CO_2} - 6 \log \frac{H_2}{CO_2} - 3 \log \frac{H_2S}{CO_2} \quad \text{y} \quad \beta = 7 \log P_{CO_2}$$

Donde $\log P_{CO_2} = -1$ si $CO_2 < 75\%$; 0 si $CO_2 > 75\%$; 1 si $CO_2 > 75\%$ y $CH_4 > 2H_2$ y $H_2S > 2H_2$. (Este es un ajuste empírico, basado en datos de pozos del campo de Larderello, Italia).

Giggenbach

Este geotermómetro utiliza las concentraciones de H_2 y Ar, bajo el supuesto de que la fugacidad del H_2 depende fuertemente de la temperatura y de que la concentración de Ar en los reservorios geotérmicos corresponde a la de agua saturada con aire, ya que el Ar geotérmico es de origen atmosférico. La fórmula es la siguiente:

$$t(C) = 70 \left(2.5 + \log \left(\frac{H_2}{Ar} \right) \right)$$

Donde la concentración de los gases está dada en porcentaje molar. Este geotermómetro es particularmente útil en la etapa exploratoria.

Geotermómetros isotópicos

El factor de fraccionamiento isotópico depende de la temperatura. Por tanto, si dos sustancias o dos fases de una misma sustancia están en equilibrio isotópico, es posible determinar el valor del fraccionamiento isotópico y, por ende, la temperatura del último equilibrio.

Existe un gran número de posibles geotermómetros. Sin embargo, solo unos pocos pueden usarse en la práctica exploratoria, ya sea por el costo del análisis o porque la información que arrojan es difícil de interpretar. Estos son los siguientes:

- Fraccionamiento del oxígeno 18 entre los sulfatos disueltos en agua y el agua misma.
- Fraccionamiento del deuterio entre el hidrógeno gas y el vapor de agua.

El geotermómetro del oxígeno 18 en sulfatos y agua es muy útil en la etapa de exploración, cuando existen manantiales clorurados sódicos de alta temperatura o hirvientes, que son descarga directa de los reservorios. El reequilibrio de este geotermómetro a menores temperaturas es muy lento, por lo que el manantial conserva la temperatura de equilibrio en el reservorio. Primero se establece el valor del fraccionamiento isotópico de las muestras del manantial, que es igual a la diferencia de los valores delta de los sulfatos y de agua, conforme a la ecuación siguiente:

$$10^3 \ln \alpha = \delta^{18}\text{O}_{\text{sulfatos}} \text{‰} - \delta^{18}\text{O}_{\text{agua}} \text{‰}$$

Una vez calculado el valor de $10^3 \ln \alpha$ se puede conocer la temperatura correspondiente, recurriendo las tablas correspondientes.

Por último, en el caso de manantiales clorurados hirvientes con desprendimiento vigoroso de vapor y gases, se puede utilizar el geotermómetro del deuterio en el vapor de agua y en el gas hidrógeno, conforme a la siguiente relación:

$$10^3 \ln \alpha = \delta D_{\text{H}_2\text{O vapor}} \text{‰} - \delta D_{\text{H}_2\text{gas}} \text{‰}$$

2.4. TÉCNICAS TERMOMÉTRICAS

Estas técnicas son las únicas que miden directamente las anomalías térmicas, que es el objetivo final de una exploración geotérmica. Se dividen en tres tipos básicamente: medición de la distribución de temperatura superficial y sub-superficial; medición de gradiente y flujo térmicos en pozos; y determinación de la descarga superficial natural de calor.

Actualmente se cuenta con un gran número de mediciones de temperatura y flujo de calor en pozos en todo el mundo. En zonas al interior de las placas tectónicas, es decir, geológicamente estables, el gradiente térmico es del orden de 0.01 a 0.03°C/m de profundidad. Según Polak, el flujo de calor promedio de la corteza oceánica es de 101 mW/m², el de los continentes de 65

mW/m^2 y el promedio global de 87 mW/m^2 . Con estos datos se obtiene que el flujo de calor total de la superficie del globo terráqueo es de 44,2 TW.

Los gradientes anómalos asociados a acuíferos hidrotermales pueden llegar ser 10 o más veces mayores; aunque un valor mayor de 3 es ya significativo. A continuación se describen estas técnicas:

2.4.1. Mediciones superficiales de radiación térmica

En el apartado “mapeadores térmicos” ya se trató este tema.

2.4.2. Mediciones sub-superficiales de temperatura

Esta técnica consiste en “hincar” en el terreno sondas del orden de 2 m de profundidad, para medir la temperatura. Se considera que a una profundidad mayor de 1 m, las variaciones diarias de la temperatura debidas a la radiación solar, dejan de ser significativas; aunque no es el caso de las variaciones estacionales. La Universidad de Nevada en Estados Unidos ha desarrollado un equipo ligero para realizar estas mediciones. En una hora aproximadamente se puede obtener una medición.

Mediante esta técnica se puede cubrir una zona extensa a un costo razonable. El inconveniente es que la información es muy somera y puede dejar sin detectar una anomalía hidrotermal profunda; por ejemplo, en el caso e que exista un acuífero potente que enmascare la anomalía.

2.4.3. Medición de gradiente y flujo térmico en pozos

Esta técnica consiste en perforar pozos de 300 a 500 m de profundidad. Estos valores son típicos y pueden variar en más o en menos, dependiendo de las condiciones geohidrológicas de la zona de interés. Como se requiere hacer perforaciones, el costo de estos estudios es significativamente mayor que el de las otras técnicas geofísicas. Precisamente en este punto reside el diseño de una prospección que dé resultados y sea viable económicamente. Las dos variables de problema son: el número de pozos y la profundidad. Lamentablemente existe un conflicto entre ambas que es difícil de resolver. Podemos optar por realizar más perforaciones poco profundas y cubrir, así, un área grande de estudio; pero con el riesgo de obtener resultados pobres, que no ayuden realmente en la ubicación y diseño de los pozos exploratorios profundos. Como alternativa, podemos perforar pocos pozos más profundos, cubriendo así menos área, y con el riesgo de pasar por alto las anomalías que buscamos.

Los criterios de diseño de los pozos de gradiente de temperatura son los siguientes. El diámetro final de pozo debe ser lo más pequeño posible, típicamente del orden de 5 cm, cuidando que la sonda de medición pueda pasar libremente. El pozo debe estar aislado hidráulicamente de la formación en toda su longitud. Para ello hay que introducir un tubo de unos 5 cm de diámetro, ciego y cerrado en la parte inferior; el espacio anular entre el tubo y la formación debe rellenarse con lodo pesado o con cemento aguado. Estas dos condiciones

tienen por objeto evitar la convección en el interior del pozo y en el espacio anular, que afectaría a una correcta medición del gradiente. La presencia de acuíferos potentes puede alterar significativamente el patrón de flujo vertical de calor; ya que estos transportan lateralmente grandes cantidades de calor, en la dirección del flujo subterráneo. En estos casos, para obtener resultados confiables, es preciso que los pozos se perforen por debajo de los acuíferos. El tubo se llena de agua hasta el brocal.

Se debe dejar reposar al pozo por un lapso de tiempo para que la columna de agua al interior de este alcance el equilibrio térmico con la formación. Esto puede durar horas o días. En la práctica, lo que hay que hacer es correr registros de temperatura de manera periódica, hasta observar que no existan variaciones. Otra posibilidad es extrapolar los resultados de un registro a condiciones de equilibrio, mediante algoritmos más o menos complicados. El más usado es el conocido como método de Horner.

Los perfiles de temperatura muestran típicamente intervalos donde el gradiente es positivo, zonas donde es pequeño o nulo y, ocasionalmente, zonas donde se vuelve negativo. Las zonas de gradiente pequeño o nulo corresponden a estrato saturados de agua, donde la convección vertical del fluido en tiempos geológicos hace que la temperatura sea uniforme. Las inversiones pueden deberse a la presencia de acuíferos potentes o al hecho de que se ha pasado por un pico de temperatura debido a un flujo de descarga lateral de un acuífero termal y, después, se regresa al gradiente normal de la formación.

Si, además de la medición del gradiente térmico, se desea determinar el flujo de calor, es necesario conocer la conductividad térmica de la formación en el intervalo de interés. Esto se puede hacer de dos maneras: primero, recurriendo a los datos disponibles en la literatura y usar el que más convenga al caso; segundo, obtener un núcleo de la formación durante la perforación y medir su conductividad en el laboratorio, en condiciones similares a las reales. Obviamente el segundo método es mejor, pero mucho más caro. Por ello, se recomienda que en una prospección normal, cuya finalidad sea el descubrimiento de yacimientos geotérmicos, se utilicen valores convencionales obtenidos de datos publicados. Lo segundo se justifica sólo en caso de estudios de carácter científico.

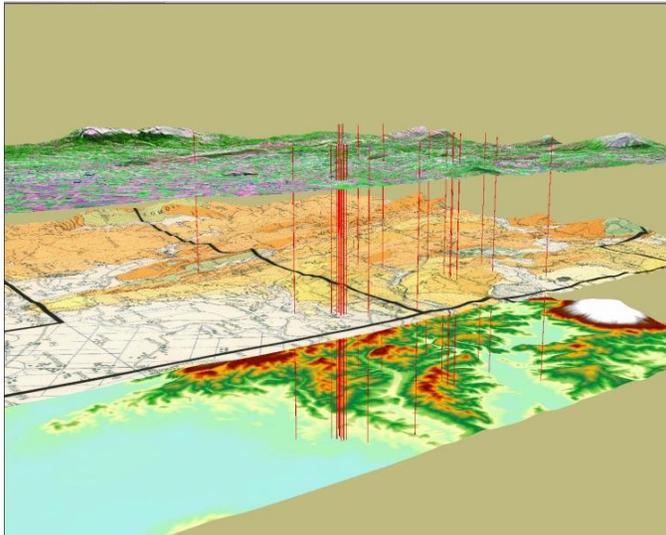
2.4.4. Determinación de la descarga natural de calor

Si se cuenta con información de temperaturas superficiales, con medición de temperatura y aforo de fumarolas y manantiales e información radiométrica es posible calcular la descarga natural de calor de una zona, en sus tres componentes, convectiva, conductiva y de radiación. Este valor da una idea del tamaño del sistema hidrotermal y puede ser útil para calibrar el modelo numérico, que en un momento dado se haga, del yacimiento.

2.5. NUEVAS TECNOLOGÍAS DE EXPLORACIÓN

En este apartado se hace énfasis en las tecnologías de reciente creación y uso, algunas de las cuales todavía están a prueba.

En la etapa de exploración geológica, se cuenta con los sistemas de información geográfica, que son una herramienta muy útil en la elaboración de la cartografía, la integración de información referenciada de procedencia diversa: imágenes de satélite, modelos digitales de altura, levantamientos geofísicos, etc. Una vez integrada, la información puede procesarse con una gran variedad de criterios y procedimientos con objeto de tener un mejor conocimiento de las condiciones superficiales y del subsuelo.

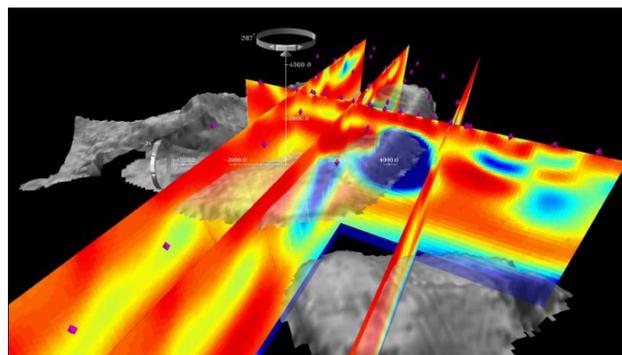
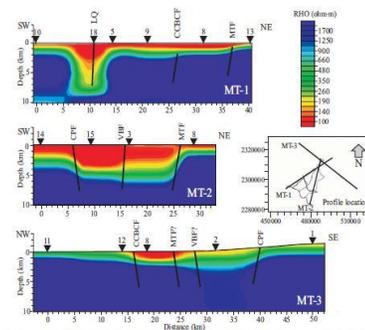


Con ayuda de la tecnología, ya es posible realizar visualizaciones en 3D en superposición de capas, ello ayuda a realizar un análisis a detalle de cada punto de interés.

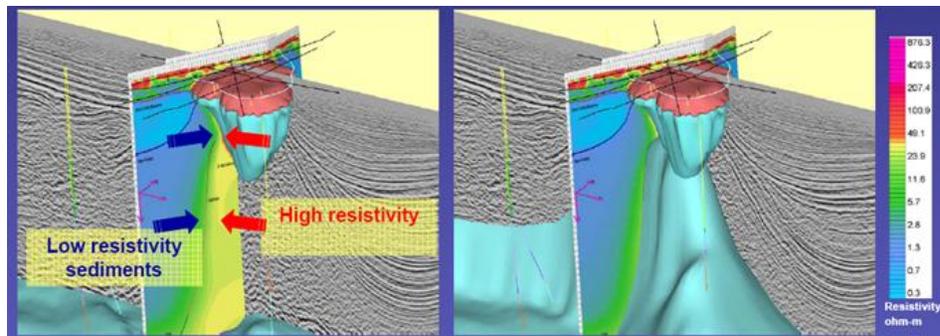
Los estudios isotópicos, tanto de isótopos estables como de radiactivos (dataciones), y de tierras raras son útiles para un estudio detallado de la evolución magmática de una zona.

En levantamientos magnetotelúricos, los equipos de medición y las técnicas de procesado han mejorado notablemente en los últimos años, de tal manera que en

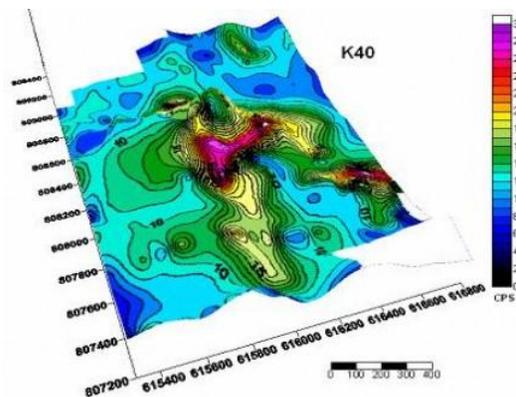
MT de amplio espectro es actualmente la tecnología preferida para estudios de resistividad del subsuelo.



En algunos campos geotérmicos se ha comenzado a usar la sísmica de reflexión, en particular en Italia. Esta tecnología, una vez que llegue a ser adaptada a ambientes de rocas volcánicas, puede convertirse en la técnica geofísica por excelencia para conocer la estructura del subsuelo a detalle. Aunado a que ya existen diferentes software y métodos de análisis de resultados que permiten correlacionar otros métodos con la sísmica de reflexión, como es posible visualizar en la siguiente imagen.



El uso de sensores remotos para estudios de radiometría y la formación de imágenes térmicas de la superficie del terreno es una tecnología todavía en desarrollo, pero que puede ser una herramienta útil en las etapas tempranas de prospección, en las que se desea cubrir una zona extensa a un costo razonable. La empresa Geo Vision ofrece una tecnología que combina las mediciones radiométricas con mediciones de radiación gamma en el aire, mediante sensores remotos; según estos expertos, la tecnología es muy efectiva para identificar anomalías térmicas en zonas extensas.



Los levantamientos aéreos TEM son una técnica probada para ciertas aplicaciones. Sin embargo, para la industria geotérmica esto es insuficiente, pues se requiere de mayor penetración en el subsuelo y mayor calidad de los datos, así como lidiar con el problema de la topografía cambiante.

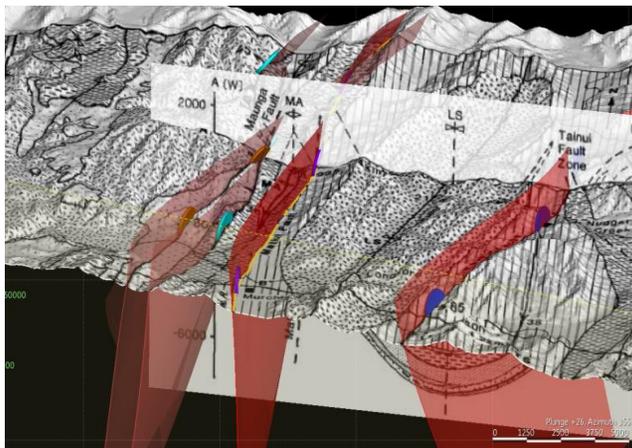
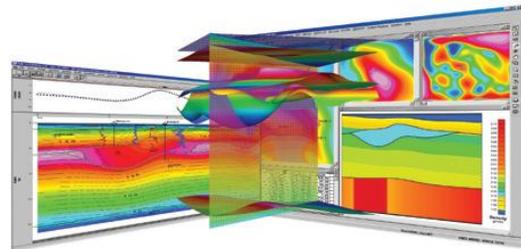
La tomografía sísmica y eléctrica son también tecnologías en desarrollo que pueden ser muy útiles en el conocimiento detallado de la estructura del subsuelo. Actualmente comienzan a

surgir métodos en los cuales ya es posible tomar la medición en las tres direcciones, generando datos y resultados en 3D. Sin embargo, estas formas de adquisición aún no han sido corroboradas para el campo de estudio Geotérmico.

La geomecánica es la ciencia que estudio el comportamiento mecánico de masas de roca sujetas a esfuerzos y deformaciones. Esta disciplina puede llegar a ser una herramienta indispensable para entender cómo y dónde se crea fallamiento y fracturamiento en las rocas, que causen permeabilidad.

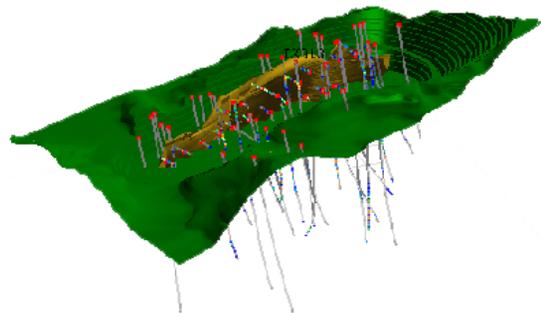
El desarrollo de software para elaborar modelos tridimensionales y multidisciplinarios es indispensable para una mejor y más rápida integración de los datos, que facilite la interpretación. Lo cual ha ido sucediendo a manera que la programación y tecnología han evolucionado, y en que las formas de visualización, análisis e interpretación presentan una gran tendencia de 3 dimensiones, para cada una de las diferentes ramas, por ejemplificar algunos se tiene los que a continuación se mencionan:

- **GEOSOFT. Oasis Montaj.** El cual permite relacionar las diferentes disciplinas en conjunto de todos los métodos geofísicos en una sola base de datos. El procesamiento de información puede ser llevado a cabo del mismo al igual que la visualización 2D, 3D.



- **LEPFROG.** Sus gráficos son considerados como los mejores de la industria. Combina mapas, secciones transversales, polilíneas, puntos, perforaciones, y ahora los datos GIS en un entorno gráfico superior para crear una interpretación 3D realistas, coherentes y fiables de su sitio. Combinando esto con herramientas como la opción flexible de corte y la transparencia real de Leapfrog hacer una valiosa herramienta para la creación rápida de un buen conocimiento de la geología.

- **VULCANO.** Tiene la capacidad para la visualización de los datos de diseño y la cartografía, la información de sondajes geológicos, modelos reticulares, superficies y sólidos triangulados, modelos de bloques, estructurales y geotécnicos. Las herramientas de la investigación se incluyen en la revisión de las mediciones y los atributos asociados a los datos gráficos.



2.6. PROGRAMA GENERAL DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

No obstante que es difícil diseñar un programa de exploración general para cualquier proyecto, debido a que cada caso tiene sus particularidades, vale la pena presentar este programa a manera de guía y sugerencia.

Los pasos a seguir son:

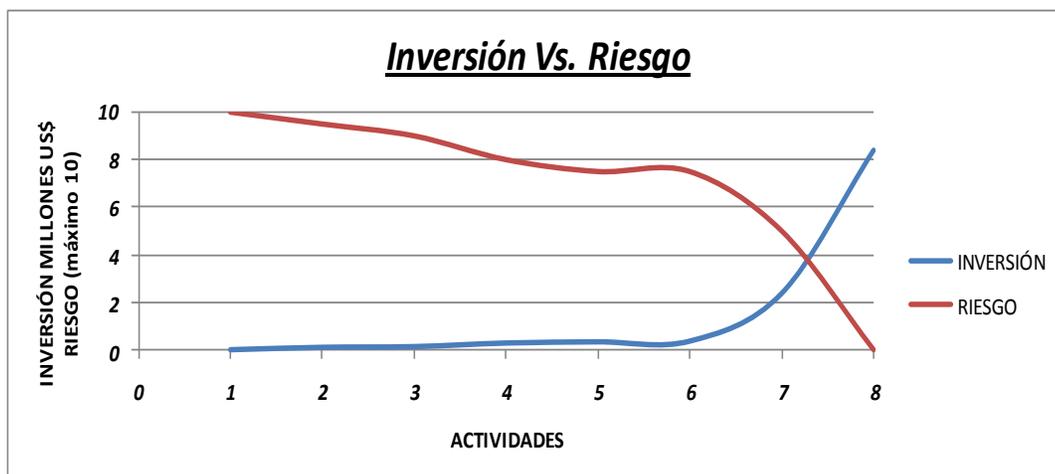
1. Elaboración de la cartografía geológica básica: modelo topográfico, plano litológico, vulcanológico y estructural. Como herramientas se deben utilizar imágenes de satélite o aéreas, modelos digitales de elevación y prospección de campo.
2. Si el área de estudio es grande y no se tienen zonas específicas identificadas, es conveniente realizar mediciones de emanación de gases del suelo, de temperatura subsuperficial o estudios radiométricos con percepción remota.
3. Identificación y muestreo de manifestaciones termales y zonas de alteración hidrotermal. Análisis químicos e isotópicos de las muestras. Procesado de los datos.
4. Estimación de la descarga natural de calor.
5. Estudio de resistividad del subsuelo. Si no se han podido definir zonas específicas, se inicia con un estudio de carácter regional, con sondeos cada 2 km. Una alternativa, en esta etapa regional, es utilizar la técnica del potencial espontáneo, que es barata y rápida. Una vez identificadas las zonas de interés, se debe llevar a cabo una campaña con mayor densidad de sondeos. La técnica más recomendada es una combinación de sondeos AMT y MT. Si esto no es posible, se recomiendan sondeos TEM.
6. Estudio de gravimetría. Antes de llevar a cabo mediciones de campo, investigar si existe información disponible. Si el área a investigar es grande, se recomienda realizar un estudio aerogravimétrico; de lo contrario se llevan a cabo mediciones sobre el terreno. En este último caso, es muy importante realizar un levantamiento topográfico de precisión simultáneo.
7. Los estudios magnetométricos son un refuerzo a los gravimétricos. No es tan importante realizar estos estudios, sobre todo si se cuenta con un presupuesto reducido. En zonas volcánicas y con topografía abrupta, la magnetometría arroja información de las unidades litológicas más someras y está muy influenciada por los cambios topográficos.
8. Perforación de pozos de gradiente de 300 a 500 m de profundidad. Medición del gradiente y flujo térmicos.
9. Integración de un modelo conceptual del yacimiento y evaluación preliminar de su potencial, mediante modelos sencillos de estimación del calor almacenado en la roca y el fluido o de descompresión progresiva.

Este sería un programa mínimo típico, al que habría que hacerle los ajustes pertinentes a cada caso.

Por último, es conveniente incluir unas palabras acerca de las inversiones requeridas durante la etapa de exploración y, en qué medida, estas inversiones van reduciendo el riesgo y aumentando la probabilidad de descubrir un yacimiento geotérmico. En la tabla que se muestra a continuación se pueden apreciar los costos típicos de las diferentes actividades exploratorias. Las inversiones en actividades de exploración superficial son de menor cuantía. Las inversiones fuertes se dan a partir de la etapa de perforación, primero de pozos de gradiente a una profundidad del orden de 500 y después con los pozos exploratorios profundos de 2000 a 2500 m de profundidad. En la misma tabla se muestra cómo va disminuyendo en riesgo de la inversión, conforme se avanza en las diferentes actividades, partiendo de un valor máximo de 10. Como puede apreciarse, el riesgo disminuye de manera considerable, solamente a partir de la perforación.

ACTIVIDAD	INVERSIÓN (millones de US\$)	INVERSIÓN ACUMULADA	RIESGO (máximo 10)
Inicio	0	0	10
Geología y cartografía	0.1	0.1	9.5
Geoquímica	0.03	0.13	9
Resistividad	0.15	0.28	8
Gravimetría y magnetometría	0.05	0.33	7.5
Integración y modelo conceptual	0.03	0.36	7.5
Pozos de gradiente 3	2	2.36	5
Pozos exploratorios 2	6	8.36	0
Integración y modelo conceptual	0.05	8.41	0

La información de la tabla se muestra de manera gráfica a continuación.



Las actividades 1 a 6 se refieren a la exploración superficial, la actividad 7 corresponde a la perforación de tres pozos de gradiente y la actividad 8, a la perforación de dos pozos exploratorios profundos en diámetros convencionales (terminación en agujero de 8.5

pulgadas). De manera convencional se ha asignado un valor máximo de 10 al riesgo, con la finalidad de que en una misma gráfica se pueda incluir riesgo e inversiones.

3. ASPECTOS LEGALES DE LA GEOTERMIA EN MÉXICO

3.1. ASPECTOS DE DERECHO COMPARADO EN MATERIA DE GEOTERMIA.

No existía en diferentes países un sistema que establezca la naturaleza jurídica de la geotermia. Algunas naciones como Ecuador la ubicaban en la minería, otras como Costa Rica en las aguas, pero casi todas han evolucionado para considerarla como una fuente energética, siendo Chile pionero en Latinoamérica al emitir una ley sobre concesiones de energía geotérmica.

Nueva Zelanda inicialmente emitió disposiciones legales regulando la geotermia bajo la explotación de aguas, pero evolucionó para establecerla legalmente como un recurso energético.

Los estados de California y Nuevo México en USA, también han emitido legislaciones locales para regular la explotación de los recursos geotérmicos.

Prácticamente en todas estas legislaciones se identifica a esos recursos como una fuente de energía renovable o sustentable

3.2. SITUACIÓN JURÍDICA DE LA GEOTERMIA EN MÉXICO

Propiedad de la Nación Sobre su Territorio. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos define la naturaleza *del derecho que la nación tiene sobre su territorio* y todos los bienes que en él se encuentren. Es al Estado en su totalidad al que se le asigna la titularidad de la propiedad sobre el territorio y no en particular a la Federación, a las entidades federativas o a los municipios.

El artículo 27, párrafo primero de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos reconoce:

“La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, *corresponde originariamente a la nación*, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada.”

Una vez constituida la propiedad privada el párrafo tercero del mismo precepto, ordena:

“La nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación para hacer una distribución equitativa de la riqueza pública y para cuidar de su conservación.

El Estado tiene una potestad soberana sobre su territorio, una propiedad originaria y tradicional, un derecho real institucional o con mayor extensión un pleno derecho de

propiedad definido y depurado por el derecho internacional, si nos atenemos a su sentido moderno.

También el Estado tiene el derecho de regular toda la propiedad, pública y privada, que otorga o concede a los particulares. El particular sustituye al Estado en el ejercicio del derecho privado, pero conservando aquél un derecho superior para regular el régimen de la propiedad como una función social, inspirada siempre en el interés público

En suma, el Estado tiene un derecho real de propiedad sobre su territorio regido por principios de derecho público interno y externo.

El Estado mexicano tiene por consiguiente un derecho de propiedad sobre su territorio, y de acuerdo con la Constitución, esta propiedad es transmitida a los particulares, sujeta al régimen jurídico que ésta determine.

El territorio es la porción de la corteza terrestre en la que se asientan los grupos humanos y se realiza la actividad estatal.

Sobre el territorio de cada Estado corresponde el ámbito de vigencia de su orden jurídico y constituye el medio de subsistencia de la población al mismo tiempo que se establecen relaciones patrimoniales entre los entes públicos y privados.

El territorio mexicano está regulado jurídicamente en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, artículos 27 y 42 a 49.

De acuerdo con el artículo 27 constitucional se reconoce la propiedad o dominio de la nación sobre su territorio. Desde su origen ella es la única titular de ese derecho real de propiedad.

El precepto constitucional nos habla de que esa propiedad corresponde originariamente a la nación, si bien esta entidad está representada por los diversos órganos que asumen la función política, o sea “la nación representada por el gobierno federal”, si nos atenemos al texto del propio artículo 27. La nación debemos pues considerarla referida, no a un concepto sociológico, sino a un concepto jurídico político como es la Federación, de acuerdo con las facultades constitucionales de que dispone.

La nación propietaria del territorio nacional tiene una importante facultad: ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de las tierras y aguas a los particulares *constituyendo la propiedad privada*.

Hemos indicado que el territorio es la porción de la corteza terrestre en la que se asientan los grupos humanos y se realiza la actividad estatal.

Sobre el territorio de cada Estado corresponde el ámbito de vigencia de su orden jurídico y constituye el medio de subsistencia de la población al mismo tiempo que se establecen relaciones patrimoniales entre los entes públicos y privados.

Sin embargo no ocurre lo mismo con los bienes del subsuelo, sobre los cuales la Nación, representada por el Ejecutivo Federal, mantiene la propiedad originaria y soberana, impidiendo su aprovechamiento libre, sino a través de concesiones, a excepción de las aguas alumbradas en los terrenos particulares, las que a su vez se encuentran limitadas por las vedas o restricciones impuestas para su explotación.

Si analizamos los diversos preceptos que regulan la propiedad, veremos que el Estado reconoce la propiedad privada al mismo tiempo que impone severas restricciones a su ejercicio, tal es, por vía de ejemplo, el párrafo tercero del artículo 27 constitucional que ordena: “La nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer *a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público*.”

3.3. LOS RECURSOS NATURALES EN LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS.

El dominio nacional o dominio del Estado es una expresión muy amplia que comprende todos los bienes corporales e incorporeales, muebles e inmuebles, que pertenecen a las diversas entidades públicas, sometidos a un régimen de derecho público y sólo por excepción a un régimen de derecho privado.

De esta manera el artículo 27, párrafos cuarto, quinto y sexto de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, expresa:

“Corresponde a la nación el dominio directo de todos los recursos naturales de la plataforma continental y los zócalos submarinos de las islas; de todos los minerales o sustancias que en vetas, mantos, masas o yacimientos, constituyan depósitos cuya naturaleza sea distinta de los componentes de los terrenos, tales como los minerales de los que se extraigan metales y metaloides utilizados en la industria; los yacimientos de piedras preciosas, de sal de gema y las salinas formadas directamente por las aguas marinas; los productos derivados de la descomposición de las rocas, cuando su explotación necesite trabajos subterráneos; los yacimientos minerales u orgánicos de materias susceptibles de ser utilizadas como fertilizantes; los combustibles minerales sólidos; el petróleo y todos los carburos de hidrógeno sólidos, líquidos o gaseosos; y el espacio situado sobre el territorio nacional, en la extensión y términos que fije el derecho internacional.”

Son propiedad de la nación las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fije el Derecho internacional; las aguas marinas interiores; las de las lagunas y esteros que se comuniquen permanente o intermitentemente con el mar; las de los lagos interiores de formación natural que estén ligados directamente a corrientes constantes; las de los ríos y sus afluentes directos o indirectos, desde el punto del cauce en que se inicien las primeras aguas permanentes, intermitentes o torrenciales, hasta su desembocadura en el mar, lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional; las de corrientes constantes o intermitentes y sus afluentes directos o indirectos, cuando el cauce de aquéllas en toda su extensión o en parte de ellas, sirva de límite al territorio nacional o a dos entidades federativas, o cuando pase de una entidad federativa a otra o cruce la línea divisoria de la República; la de los lagos, lagunas o

esteros cuyos vasos, zonas o riberas, estén cruzados por líneas divisorias de dos o más entidades o entre la República y un país vecino, o cuando el límite de las riberas, sirva de lindero entre dos entidades federativas o a la República con un país vecino; las de los manantiales que broten en las playas, zonas marítimas, cauces, vasos o riberas de los lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional, y las que se extraigan de las minas; y los cauces, lechos o riberas de los lagos y corrientes interiores en la extensión que fije la ley. Las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno, pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos, el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aun establecer zonas vedadas, al igual que para las demás aguas de propiedad nacional. Cualesquiera otras aguas no incluidas en la enumeración anterior, se considerarán como parte integrante de la propiedad de los terrenos por los que corran o en los que se encuentren sus depósitos, pero si se localizaron en dos o más predios el aprovechamiento de estas aguas se considerará de utilidad pública, y quedará sujeto a las disposiciones que dicten los Estados.

En los casos a que se refieren los dos párrafos anteriores, el dominio de la nación es inalienable e imprescriptible y la explotación, el uso o el aprovechamiento de los recursos de que se trata, por los particulares o por sociedades constituidas conforme a las leyes mexicanas, no podrá realizarse sino mediante concesiones otorgadas por el Ejecutivo Federal de acuerdo con las reglas y condiciones que establezcan las leyes. Las normas legales relativas a obras o trabajos de explotación de los minerales y sustancias a que se refiere el párrafo cuarto, regularán la ejecución y comprobación de los que se efectúen o deban efectuarse a partir de su vigencia, independientemente de la fecha de otorgamiento de las concesiones, y su inobservancia dará lugar a la cancelación de éstas. El gobierno federal tiene la facultad de establecer reservas nacionales y suprimirlas. Las declaratorias correspondientes se harán por el Ejecutivo en los casos y condiciones que las leyes prevean. Tratándose del petróleo y de los carburos de hidrógeno sólidos, líquidos o gaseosos, no se otorgarán concesiones ni contratos ni subsistirán los que se hayan otorgado y la nación llevará a cabo la explotación de esos productos, en los términos que señale la ley reglamentaria respectiva. Corresponde exclusivamente a la nación generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio público. En esta materia no se otorgarán concesiones a los particulares y la nación aprovechará los bienes y recursos naturales que se requieran para dichos fines.”

De dicho régimen se deduce claramente que corresponde a la nación el dominio directo de todos los recursos naturales.

3.3.1 La Reglamentación Constitucional del Subsuelo.

El subsuelo en la Constitución no está regulado como recurso natural, sino que se considera a través de sus usos para la regulación de la minería y de los hidrocarburos, así como el régimen de las aguas subterráneas. No es considerado como un recurso natural o ambiental, es decir, en tanto su utilización como espacio, como sustento para el equilibrio de otros elementos del ecosistema o para prestar un servicio ambiental como espacio para depósito o lugar de confinamiento de residuos peligrosos o de rellenos sanitarios.

El principio constitucional es el párrafo primero del artículo 27, antes señalado, de suerte tal que bajo este principio podemos decir que el concepto de tierras y territorio abarcaría a su vez el concepto de subsuelo.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos no regula específicamente a los suelos como tales, sino los considera por sus usos.

En México se omite la regulación del subsuelo, regulándose únicamente los usos superficiales del suelo, sin tomar en consideración que puedan existir zonas en las que el subsuelo o sus usos tengan mayor importancia que la superficie.

La del suelo superficial que se encuentra regulado por:

Legislación civil (propiedad inmobiliaria)

Legislación agraria (propiedad rural, pequeña propiedad y propiedad comunal y ejidal)

Legislación urbana (asentamientos humanos).

La del subsuelo que se encuentra regulado por:

Legislación minera

Legislación de aguas del subsuelo

Legislación petrolera

Legislación ambiental (confinamientos de residuos peligrosos y rellenos sanitarios)

La constitución en el artículo 27 regula de una u otra manera todos estos usos del suelo y del subsuelo y tiene como prioridad el uso superficial del suelo; sólo en el caso del petróleo es prioritario el aprovechamiento del subsuelo.

3.3.2 Régimen Constitucional de las Aguas del Subsuelo.

El concepto de aguas del subsuelo en la constitución se encuentra en el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que señala:

“Las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno; pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos, el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aún establecer zonas vedadas, al igual que para las demás aguas de propiedad nacional”.

El principio que permite la reglamentación de aguas del subsuelo se encuentra en el artículo 27, párrafo quinto, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos:

“... pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos, el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aún establecer zonas vedadas, al igual que para las demás aguas de propiedad nacional.”

De esta manera, el Estado, aunque establece el libre alumbramiento de las aguas del subsuelo, en la práctica ocurre que se reserva dicho alumbramiento, al través de los permisos para la extracción de aguas del subsuelo y establecimiento de zonas de veda, las que se encuentran establecidas prácticamente en todo el territorio nacional, como más adelante se abordará.

3.3.3 Ley de Aguas Nacionales.

La Ley de Aguas Nacionales (Diario Oficial de la Federación del primero de diciembre de mil novecientos noventa y dos), tiene por objeto regular la explotación uso o aprovechamiento de las aguas propiedad de la nación, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad.

Los mecanismos que la Ley de Aguas Nacionales contiene para la protección de las aguas nacionales, entre las que consideramos a las aguas del subsuelo, de acuerdo a los artículos 6, 7 y 38, son:

La reglamentación de la extracción y utilización de aguas nacionales.

El establecimiento de zonas de veda.

La declaración de reservas de agua.

Estas medidas en caso de interés público puede aplicarlas el ejecutivo Federal en los siguientes casos:

Cuando se requiera un manejo hídrico específico para garantizar la sustentabilidad hidrológica.

Cuando se trate de la prestación de un servicio público; se implante un programa de restauración, conservación o preservación, o bien el Estado resuelva realizar directamente la explotación de las aguas.

Cuando se controlan los aprovechamientos, en razón al deterioro en cantidad o calidad del agua o el daño a cuerpos de agua superficiales o subterráneos.

Conforme al artículo 39, en la reglamentación de la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales el ejecutivo federal debe fijar:

Los volúmenes de extracción y descarga que se podrán autorizar.

Las modalidades o límites de los derechos de los concesionarios y asignatarios.

Las demás disposiciones especiales que se requieran.

El Ejecutivo Federal de acuerdo al artículo 19 tiene la facultad para reglamentar y regular a) la extracción y utilización de aguas nacionales; b) establecer zonas de veda, o; c) declarar reservas de agua. Esta regulación es de utilidad pública y el control de la extracción y utilización de las aguas del subsuelo, inclusive de las que hayan sido libremente alumbradas, también lo es.

El artículo 18, párrafo último, establece que el uso de las aguas del subsuelo causará contribuciones fiscales.

La explotación, uso y aprovechamiento de las aguas nacionales se realizará mediante concesiones otorgadas por el Ejecutivo Federal, lo que se deja establecido en el artículo 20, a su vez conforme al artículo 21 la concesión deberá contener, entre otros datos, los siguientes:

Nombre y domicilio del concesionario.

Cuenca hidrológica, acuífero en su caso, municipio y localidad a que se refiere la solicitud.

Volumen de extracción y consumo.

Uso inicial del agua.

Punto de descarga con las condiciones de cantidad y calidad.

Para el otorgamiento de una concesión se tomará en cuenta la disponibilidad del agua conforme a la programación hidráulica, aún las del subsuelo, considerando las reservas o vedas impuestas por la Comisión Nacional del Agua, órgano del ejecutivo encargado del cuidado, administración y prevención de contaminación de las aguas, así como del otorgamiento de concesiones para su explotación.

En materia de prevención y control de la contaminación de las aguas, la Ley establece en su artículo 86 que la Autoridad del Agua deberá vigilar y establecer el cumplimiento de las condiciones generales de descarga, para evitar que las aguas residuales se viertan en aguas y bienes nacionales o puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos. También conforme al artículo 87 dicha entidad determinará los parámetros que deben cumplir las descargas, mismos que se establecen en los artículos 278-B y 278-C de la Ley Federal de Derechos.

3.4. ESTADO JURÍDICO DE LA GEOTERMIA EN MÉXICO

La geotermia no se encuentra establecida o definida en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, sin embargo, existen algunas definiciones que permiten acercarse a una regulación jurídica de la geotermia, en la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-150-SEMARNAT-2006, QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL QUE DEBEN OBSERVARSE EN LAS ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE POZOS GEOTÉRMICOS PARA EXPLORACIÓN, UBICADOS EN ZONAS AGRÍCOLAS, GANADERAS Y ERIALES, FUERA DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS Y TERRENOS FORESTALES (DOF 6-III-2007), y ahora en la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética:

En la norma oficial citada encontramos las siguientes definiciones:

“3.4 campo geotérmico: Área delimitada por los pozos geotérmicos exploratorios y que corresponde a la extensión del yacimiento por explotar.

3.8 fluido geotérmico: Mezcla extraída de los pozos geotérmicos compuesta por agua y vapor, así como por sales y gases incondensables como el bióxido de carbono y ácido sulfhídrico.

3.10 geotermia: Fuente de energía renovable relacionada con volcanes, géiseres, aguas termales y zonas tectónicas. La energía geotérmica es el calor interno que se genera a partir de la actividad geológica de la Tierra, que se manifiesta al ascender a la superficie en forma de agua caliente o vapor.

3.15 plataforma de perforación: Área para la instalación y operación de un equipo de perforación de pozos con los accesorios y maniobras correspondientes, así como las casas móviles.

3.16 pozo geotérmico: Instalación que mediante la perforación que se hace en el subsuelo, tiene como propósito obtener información geológica y extracción de vapor.”

Sin embargo, la geotermia se encuentra comprendida como parte de la Ley de Aguas Nacionales, considerados como **aguas con temperatura mayor a ochenta grados centígrados**, cuando en realidad dichos recursos resultan ser de calidades físicas y contenido químico, diversos a las aguas normalmente utilizadas para consumo humano y otros usos, pues inclusive desde su origen contienen sustancias que podrían resultar contaminantes para las aguas “claras” del subsuelo y superficiales, por lo que requieren de un manejo específico.

En efecto, el artículo 81 de la Ley de Aguas Nacionales determina que:

“La explotación, el uso o aprovechamiento de aguas del subsuelo en estado de vapor o con temperatura superior a ochenta grados centígrados, cuando se pueda afectar un acuífero, requerirán de la concesión previa para generación geotérmica u otros usos, además de evaluar el impacto ambiental”.

A su vez el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, en su dispositivo 126 ordena:

“El uso de agua en estado de vapor para la generación de energía eléctrica y el uso de agua para enfriamiento se considerará uso industrial.”.

De esta suerte tenemos que el legislador consideró, que los reservorios geotérmicos tienen una calidad diversa a las de las aguas del subsuelo “claras o de primer uso”.

Ahora bien, en la Ley de Aguas Nacionales no se prevé el aprovechamiento de la energía calorífica, que es el producto principal de la geotermia; aprovechamiento que no implica necesariamente un uso consuntivo de esos fluidos, lo que ha dado lugar a controversias en cuanto a la explotación de tales salmueras

Por otra parte, también encontramos alusión a la geotermia en el artículo tercero, fracción II, inciso e), y artículo cuarto de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (DOF 28-XI-2008), estableciendo el primero que se entenderá por energías renovables, entre otras, **“el calor de los yacimientos geotérmicos”.**

De ello se advierte contradicción entre ambas leyes, para la una son aguas, para la otra es calor.

Ahonda la contradicción el señalado artículo cuarto, al prever que *“el aprovechamiento de los cuerpos de agua, los bioenergéticos, el viento y los recursos geotérmicos, así como la explotación de minerales asociados a los yacimientos geotérmicos, para la producción de energía eléctrica, se sujetará y llevará a cabo de conformidad con las disposiciones jurídicas aplicables en la materia.”*

A saber, no se explotan las sales o minerales asociados a los yacimientos geotérmicos para la producción de energía eléctrica, **aunque tal aprovechamiento alterno estaría comprendido en la concesión de aprovechamiento, uso y explotación de aguas nacionales, sin requerirse concesión minera.**

3.5. LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON GEOTERMIA

De acuerdo con el artículo veintisiete de la norma fundamental, la generación, conducción, transformación, distribución y abastecimiento de energía eléctrica corresponde a la Nación, la que a su vez, por virtud de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, deposita la prestación del servicio público en la Comisión Federal de Electricidad, entidad paraestatal con personalidad y patrimonio propios, sin que en esa materia se otorguen concesiones, determinando a su vez el artículo 28 constitucional que la prestación del servicio público de energía eléctrica es de importancia estratégica para la Nación, por lo que su prestación exclusiva por el estado no constituye monopolio.

Ahora bien, en el caso de la generación geotermoeléctrica, no existe limitante para su explotación por particulares, pues en todo caso los interesados deben sujetarse a las disposiciones existentes en materia de explotación de las aguas del subsuelo y desde luego a las de protección al ambiente.

A continuación se exponen de manera sinóptica, las autorizaciones, requeridas para la explotación geotermoeléctrica, haciéndose hincapié en que cualquier otro uso paralelo o alterno de la geotermia, se encontraría comprendido en el indicado catálogo:

3.5.1 Titularidad de la propiedad

Autorización o Requisito	Dependencia	Descripción/Fundamento Jurídico	Plazo de resolución	Etapa/Observaciones
Título de Propiedad o de Posesión del Inmueble	Notario Público	Es el documento protocolizado en el cual se hace constar la propiedad del inmueble	Variable	CONSTRUCCIÓN

3.5.2 Autorizaciones federales con diferentes dependencias en materia ambiental

Autorización o Requisito	Dependencia	Descripción/Fundamento Jurídico	Plazo de resolución	Etapa/Observaciones
Autorización en Materia de Impacto Ambiental	SEMARNAT/SGP A	Autorización para llevar a cabo actividades u obras que puedan causar desequilibrio ecológico. Art. 28 fr II y Art. 30 de LGEEPA	60 días hábiles (60 días hábiles más, en caso de requerirse información adicional) 60 días ampliación del plazo	Observar y aplicar las medidas de preservación, mitigación y compensación de impactos ambientales establecidos en el documento de Manifestación de Impacto Ambiental y en la Autorización de la Autoridad Ambiental.

<p>Autorización en materia de cambio de uso de suelo de terrenos forestales (ETJ)</p>	<p>SEMARNAT/SGP A</p>	<p>Autorización para llevar a cabo el cambio de uso de suelo en terrenos forestales</p> <p>Art. 117 y 118 de LGEEPA</p>	<p>60 días hábiles</p>	<p>Se observarán y aplicarán las medidas de prevención y mitigación indicadas en el ETJ</p>
<p>Gestión ambiental respecto al manejo de residuos peligrosos</p>	<p>SEMARNAT Delegación Estatal</p>	<p>Manejo de los residuos peligrosos que genere, conforme a los lineamientos de la normativa ambiental vigente en la materia (Manifiesto de empresa generadora de residuos peligrosos, identificación, envasado, almacenamiento, transporte y disposición final), comprometida a observar y aplicar la LGIPGIR su Reglamento y Normatividad aplicable.</p>	<p>30 días hábiles</p>	<p>CONSTRUCCIÓN</p>
<p>Licencia Ambiental Única</p>	<p>SEMARNAT/Delegaciones Estatales</p>	<p>Si una instalación califica como fuente fija de emisiones a la atmósfera requiere autorización para que la fuente pueda emitir olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera.</p> <p>Art. 18 R LGEEPA en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la atmósfera.</p>	<p>60 días hábiles</p>	<p>OPERACIÓN</p>

Cédula de Operación Anual	SEMARNAT/ Delegaciones Estatales	Obligación de remitir a SEMARNAT dentro del periodo comprendido del 1º Enero al 30 de Abril de cada año la Cédula de Operación Anual de la instalación Art. 11 de la RLGEEPA en materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Art. 73 del RLGPGIR.	60 días hábiles	CONSTRUCCIÓN/ OPERACIÓN
Declaración de autodeterminación de categorización de generador de Residuos Peligrosos.	SEMARNAT/ Delegación Estatal	Se debe efectuar la Declaración de autodeterminación de generador de residuos peligrosos de acuerdo al transitorio Séptimo Fracción I del RLGPGIR.	30 días hábiles	CONSTRUCCIÓN/ OPERACIÓN
Registro e incorporación de los Planes de Manejo de Residuos Peligrosos.	SEMARNAT/ Delegación Estatal	Elaborar y presentar los Planes de Manejo de Residuos Peligrosos Artículo 24 del RLGPGIR.	30 días hábiles	CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN

3.5.3 En materia de agua

Autorización o Requisito	Dependencia	Descripción/Fundamento Jurídico	Plazo de resolución	Etapas/Observaciones
Permiso para obras de perforación	CONAGUA/ Delegación Estatal	Explotación, uso o aprovechamiento de aguas del subsuelo Ley de Aguas Nacionales Art. 42 y 98 LAN	60 días hábiles	CONSTRUCCIÓN/OPERACIÓN
Título de asignación de aguas.	CONAGUA/ Delegación Estatal	Asignación de volumen de agua a utilizar. Ley de Aguas Nacionales Art. 20 y 21 LAN	60 días hábiles	CONSTRUCCIÓN/OPERACIÓN
Permiso de descargas de aguas residuales	CONAGUA	Contar con el registro de la descarga a cuerpos receptores propiedad de la nación. Se autoriza la realización de descargas de aguas residuales en cuerpos receptores de jurisdicción federal. Arts. 87, 88 y 88 Bis LAN	90 días hábiles	OPERACIÓN

Autorización o Requisito	Dependencia	Descripción/Fundamento Jurídico	Plazo de resolución	Etapa/Observaciones
Solicitud de modificación o derivación de la toma de agua potable.	Organismo Municipal Operador de Aguas	Solicitud para modificar la ubicación o el número de tomas de agua potable.	Variable	CONSTRUCCIÓN/OPERAC IÓN (en caso de requerirse)
Solicitud para la disposición de aguas residuales sanitarias	Organismo Municipal Operador de Aguas	Solicitud para disponer de las aguas residuales sanitarias.	Variable	CONSTRUCCIÓN
Pagos de derechos por descarga de aguas residuales	CONAGUA/ Delegación Estatal	Realizar el pago de derechos por las descargas de aguas a cuerpos receptores propiedad de la nación conforme al volumen de descarga y cumplimiento de los parámetros de D.Q.O Y S.S.T. o de condiciones particulares de descarga o de la NOM aplicable. Art. 125 LGEEPA Arts. 276-286 LFD.	60 días hábiles (En la práctica entre 1 a 3 años)	OPERACIÓN
Certificado de aprovechamiento de aguas salobres	CONAGUA/ Delegación Estatal	Obtener el certificado para exentar el pago de derechos de aguas nacionales Art. 224 LFD	Variable	CONSTRUCCIÓN/OPERAC IÓN

3.5.4 De otras secretarías de estado

Autorización o Requisito	Dependencia	Descripción/Fundamento Jurídico	Plazo de resolución	Etapas/Observaciones
Registro de recipientes sujetos a presión.	Secretaría del Trabajo y Previsión Social	Registro para el control y supervisión de recipientes sujetos a presión. Art. 91 RIGVRP	Variable	CONSTRUCCIÓN/OPERACIÓN

3.5.5 Estatales o municipales

Autorización o Requisito	Dependencia	Descripción	Plazo de resolución	Etapas/Observaciones
Licencia Sanitaria	Secretaría de Salud.	Licencia necesaria para la realización de cualquier construcción u obra. Ley de Salud del Estado	Variable	CONSTRUCCIÓN/
Autorización Sanitaria.	Secretaría de Salud	Autorización para la modificación, ampliación o adecuación de edificios o locales. Ley de Salud del Estado	Variable	CONSTRUCCIÓN. (En caso de requerirse)
Licencia de Uso de Suelo.	Municipio.	Autorización para llevar a cabo determinadas obras en los inmuebles correspondientes. Ley de Desarrollo Urbano	30 días hábiles	CONSTRUCCIÓN

Licencia de Construcción.	Dirección de Obras Públicas Municipales.	Licencia necesaria para la construcción de cualquier obra. Ley Orgánica Municipal del Estado	Variable	CONSTRUCCIÓN.
Autorización de sistemas contra incendios.	Cuerpo de Bomberos Municipal.	Autorización que a solicitud de la Dirección de Obras Publicas Municipales deberá obtenerse.	Variable	CONSTRUCCIÓN. (Si se requiere)
Generación de residuos sólidos Urbanos	Municipio	Autorización para actividades por las que se genere recolección, almacenamiento, transporte, etc., de residuos sólidos urbanos Ley de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos	Variable	CONSTRUCCIÓN/OPE RACIÓN
Generación de Residuos de Manejo Especial	Dirección General de Ecología del Estado	Autorización para actividades por las que se genere recolección, almacenamiento, transporte, etc., de residuos sólidos de Manejo Especial Ley de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos	Variable	CONSTRUCCIÓN/OPE RACIÓN
Plan de Manejo de residuos Urbanos	Municipio	Registro de plan de Manejo de Residuos Urbanos Art. 33 de la LGPGIR	Variable	CONSTRUCCIÓN/OPE RACIÓN
Plan de Manejo de residuos de Manejo Especial	Dirección General de Ecología del Estado	Registro de plan de Manejo de Residuos de Manejo Especial Art 33 de la LGPGIR	Variable	CONSTRUCCIÓN/OPE RACIÓN

Permiso para la emisión de ruido, vibraciones y energía térmica en actividades no cotidianas	Municipio	Reglamentos Municipales de Construcción	Variable	CONSTRUCCIÓN (En caso de requerirse)
--	-----------	---	----------	---

3.5.6 Comisión reguladora de energía.

Autorización o Requisito	Descripción	Fundamento Jurídico	Plazo de resolución	Etapa/ observaciones
Solicitud de permiso de producción independiente de energía eléctrica	<p>El solicitante deberá presentar junto con el formato de solicitud los documentos anexos que se indican:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Documentación que acredite la existencia legal del solicitante o de los copropietarios de las instalaciones, en su caso; b) Testimonio del poder notarial del representante legal, en su caso; c) Descripción en términos generales del proyecto, incluyendo las características de la planta y de las instalaciones accesorias; d) Información relativa al uso de aguas nacionales, en su caso; e) Información concerniente al cumplimiento de normas en materia ecológica; f) Información sobre el uso del suelo; g) Documentación que acredite la propiedad, posesión o autorización para el aprovechamiento de la superficie que ocuparán las instalaciones o, en su defecto, informe acerca de los actos jurídicos previstos para tal efecto; h) Programa de obra, incluyendo las fechas de inicio y terminación de las obras respectivas, incluyendo la fecha de puesta en servicio y considerando, en su caso, las etapas sucesivas; i) Sistemas de seguridad de las instalaciones y consideraciones de protección civil; j) Diagrama del proceso y balance térmico en caso de plantas termoeléctricas; k) Croquis de las líneas de transmisión que se requieren, en su caso; l) Copia de la resolución en que se adjudica la convocatoria por parte de Comisión Federal de Electricidad al productor, en su caso, y m) Comprobante del pago de derechos, en su caso. 	<p>Artículos 3, fracción I, 36, fracción III y bases 3), 4) y 5), 36 bis, 37 y 38 de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica; 1, 3, 16, fracción X, y 57, fracción I de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo; 2, fracción II y 3, fracciones XII y XXII de la Ley de la Comisión Reguladora de Energía y 72, fracción I, inciso a), 77, 78, 81, 82, 83, 84, 86, 87, 88, 90, 108, 109 y 110 del Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.</p>	<p>20 días hábiles a partir de que ésta sea admitida a trámite.</p>	<p>PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN</p>

<p>Solicitud de permiso de pequeña producción de energía eléctrica</p>	<p>El solicitante deberá presentar junto con el formato de solicitud los documentos anexos que se indican:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Documentación que acredite la existencia legal del solicitante o de los copropietarios de las instalaciones, en su caso; b) Testimonio del poder notarial del representante legal, en su caso; c) Descripción en términos generales del proyecto, incluyendo las características de la planta y de las instalaciones accesorias; d) Información relativa al uso de aguas nacionales, en su caso; e) Información concerniente al cumplimiento de normas en materia ecológica; f) Información sobre el uso del suelo; g) Documentación que acredite la propiedad, posesión o autorización para el aprovechamiento de la superficie que ocuparán las instalaciones o, en su defecto, informe acerca de los actos jurídicos previstos para tal efecto; h) Programa de obra, incluyendo las fechas de inicio y terminación de las obras respectivas, incluyendo la fecha de puesta en servicio y considerando, en su caso, las etapas sucesivas; i) Sistemas de seguridad de las instalaciones y consideraciones de protección civil; j) Diagrama del proceso y balance térmico en caso de plantas termoeléctricas; k) Croquis de las líneas de transmisión que se requieren, en su caso; l) Croquis del área en la que operará el solicitante; m) Información sobre el cumplimiento de lo dispuesto por el artículo 113 fracciones I y II del Reglamento (en caso de Abasto a comunidades rurales), y n) Comprobante del pago de derechos, en su caso. 	<p>Artículos 3, fracción I, 36, fracción IV y bases 1), 3), 4) y 5), 37 y 38 de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica; 1, 3, 16, fracción X, y 57, fracción I de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo; 2, fracción II y 3, fracciones XII y XXII de la Ley de la Comisión Reguladora de Energía y 72, fracción I inciso b), 77, 78, 81, 82, 83, 84, 86, 87, 88, 90, 111, 112, 113, 114 y 115 del Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.</p>	<p>50 días hábiles a partir de que ésta sea admitida a trámite.</p>	<p>PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN</p>
--	---	---	---	---------------------------------

3.6: CONCLUSIÓN

El marco regulatorio actual presenta deficiencias importantes en la parte relativa a las concesiones para el uso y aprovechamiento de los recursos geotérmicos, no tanto en la definición legal de su posible aprovechamiento, sino en lo referente a la seguridad legal de su inversión que tendría un desarrollador privado de la geotermia.

La Constitución Mexicana establece que los recursos de agua subterránea son propiedad de la nación y pueden ser explotados por particulares mediante concesiones. Las concesiones están reguladas por la Ley de Aguas Nacionales y su reglamento.

Aunque es importante mencionar que existen zonas del país bajo la figura de libre alumbramiento, donde no se requiere concesión y por lo tanto se facilita la adquisición del recurso, hay poca certidumbre al quedar abierta la posibilidad para que, con pleno derecho, otro inversionista privado extraiga recursos geotérmicos del mismo yacimiento una vez que otro inversionista privado visionario ha corrido el riesgo de explorar y perforar una serie de pozos profundos, invirtiendo capital al proyecto.

Las concesiones actuales se otorgan por un cierto volumen anual de agua extraída, para todos los casos, incluyendo las aguas geotérmicas. Habría que adecuar la legislación de tal forma que las concesiones geotérmicas se otorguen con una cierta área geográfica, que garantice exclusividad sobre los recursos geotérmicos que se encuentran en dicha área y facilite los necesarios derechos de paso en superficie. Esto es algo similar al caso de las concesiones mineras. Esta adecuación no es sencilla, ya que implicaría armar la figura de licitación pública de la concesión geotérmica en terrenos que generalmente son ejidales.

En el diseño de un esquema de concesiones (con o sin licitación pública) habrá que incluir en su momento las que no sólo hagan referencia al yacimiento geotérmico profundo sino que también a los yacimientos someros. Existen bajo el esquema actual acuíferos (superficiales) en veda de los cuales no es posible realizar nuevos aprovechamientos, ya que están sobre explotados y en la mayor parte de los casos no tienen conexión con el acuífero profundo, y es evidente que si se trata de agua caliente, se le puede extraer el calor sin tener un uso consuntivo.

La ley de aguas Nacionales exige como condición para otorgar una concesión que el solicitante sea dueño o tenga derechos de uso sobre el territorio donde se ubica la concesión. En el caso de concesiones geotérmicas esto no debería ser un requisito.

En la misma línea habría que eliminar las disposiciones relativas a los permisos de descarga de las aguas geotérmica, ya que estas se reinyectan al yacimiento del que se extrajeron. Asimismo, se debería eliminar el permiso de aprovechamiento de aguas salobres por la misma razón.

Las concesiones deberían contemplar dos etapas: exploración y explotación. En ambos casos, el titular de la concesión deberá garantizar ciertas inversiones calendarizadas. En caso de no cumplir se perdería la concesión. Esto con el objeto de evitar la especulación o que la concesión quede en el papel, sin acciones decididas por parte del titular.

Esta propuesta (caso de concesión por exploración), deberá estar enfocada a incentivar y apoyar de forma ágil la etapa exploratoria en la cual se requiere hacer pozos nuevos, en los cuales no se tiene la certeza de obtener fluido (agua-vapor), para lo cual se deberían simplificar los requerimientos, obligaciones y tramitología, haciendo una marcada diferencia entre la etapa exploratoria y de desarrollo del proyecto.

Durante la etapa de exploración el titular deberá presentar un programa de actividades e inversiones, que sustituya a los permisos que la ley y reglamento actual exigen.

Los derechos otorgados en cada etapa serían distintos y acordes con la naturaleza de los trabajos e inversiones a realizar. El área superficial garantizada por la concesión de los trabajos de exploración debería reducirse finalmente conforme estos avanzan. Al final sólo una parte de la superficie de la concesión para exploración quedaría garantizada por la concesión de explotación.

De igual manera la duración de la concesión deberá ser la adecuada en cada etapa: de 2 a 3 años para la etapa de exploración y de un mínimo de 30 años para la explotación, con la posibilidad de renovarse.

La regulación deberá contemplar un mecanismo para la asignación de las concesiones cuando haya más de una persona interesada.

Por el momento, la forma más sencilla de simplificar en parte los procedimientos administrativos, sería adicionar un capítulo específico sobre geotermia a la Ley de Aguas Nacionales.

Por otra parte, la regulación en materia de impacto ambiental se considera adecuada, aunque sería conveniente añadir un párrafo específico con relación a las actividades de exploración que requieran de permiso ambiental previo, por ejemplo, la perforación de pozos exploratorios profundos.

Un tema que es secundario, pero que puede tener relevancia en algunos casos concretos, son los derechos de explotación de las sales y minerales que pudieran estar contenidos en la salmuera geotérmica y que pudieran tener un valor comercial. Esto debería ser parte integrante de la concesión geotérmica.

Los aspectos relativos a la generación de energía eléctrica, de interconexión a la red y de uso de la energía están debidamente reglamentados.

Finalmente, un desarrollador privado busca protección y certidumbre jurídica para evitar que otro desarrollador se establezca a unos cuantos metros de sus instalaciones y utilice el mismo recurso geotérmico. Esto hay que atenderlo.

Actualmente las concesiones de agua, mineras y propiedad de terreno son la vía para que un desarrollador privado garantice la propiedad del recurso. Lo cual le obliga a comprar grandes extensiones de terreno, asegurar a veces en exceso las concesiones de agua sin rebasar el volumen disponible del acuífero somero, así como realizar el denuncia minero cubriendo grandes extensiones del proyecto.

En resumen en el marco regulatorio actual el desarrollo de un proyecto geotérmico privado es legal, pero está sujeto a incertidumbres que desalientan la inversión. Esto lleva a recomendar que se hagan a la brevedad los ajustes propuestos a la Ley Nacional de Aguas y su Reglamento y que a la par se inicie una revisión mucho más de fondo de los aspectos legales para determinar primero el esquema jurídico que la nación le quiera dar a la explotación geotérmica por la industria privada y finalmente proponer los esquemas legales adecuados para llegar de forma ordenada al fin perseguido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Romero, M., 1975. *Teoría general del derecho administrativo*. México, UNAM.
- Alonso, H., 1985. Present and planned utilization of Geothermal Resources in Mexico. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 9, pp. 135-140.
- Arredondo F., J.J., 2005. Integración de datos geofísicos de la zona geotérmica de San Pedro, Nay. Reporte No. GF-SP-05-05, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Baker, E.T., and C.R. German, 2004. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. In: *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans*. C.R. German, J. Lin, and L.M. Parson (eds.). Geophysical Monograph Series, 148, pp. 245-266.
- Brañes Ballesteros, R., 1995. *Manual de Derecho Ambiental Mexicano*. Fundación Mexicana para la Educación Ambiental y Fondo de Cultura Económica, México, 1995.
- Bigurra P., E., 1984. Pathé, Hidalgo: Integración de Estudios. Informe 34-83, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Canet, C., R.M. Prol-Ledesma, I. Torres-Alvarado, H.A. Gilg, R.E. Villanueva, and R. Lozano-Santa Cruz, 2005. Silica-carbonate stromatolites related to coastal hydrothermal venting in Bahía Concepción, Baja California Sur, Mexico. *Sedimentary Geology*, 174, (2005), pp. 97–113.
- Canul Dzul, R., y G. Ramírez Silva, 1985. Estudio geológico a semi-detalle de la zona geotérmica de Puruándiro, Michoacán. Informe 31-85, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Canul Dzul, R., y V.S. Rocha López, 1981. Informe geológico de la zona geotérmica de “El Chichonal”. Chis. Informe 32-81, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Casarrubias U., Z., 1995. Propuesta para la perforación de un pozo de gradiente en Pathé, Hidalgo. Reporte OGL-PA-008/94, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Castillo Hernández, D., 1996. Soporte técnico para la localización de dos pozos de gradiente en la zona geotérmica de Santiago Papasquiaro, Dgo. Reporte GG-HE-014-96, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Castillo Hernández, D., 1998. Resultados de la perforación del pozo HE-1, P.G. Los Hervideros, Dgo. Reporte GG-HE-05-98, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- De la Cruz Martínez, V., y R. Hernández Zúñiga, 1986. Estudio geológico a semi-detalle de la zona geotérmica de El Molote, Nay. Informe 11-86, Depto. de Exploración, CFE, Inédito.
- De la Cruz Martínez, V., y R. Hernández Zúñiga, 1986. Geología del Volcán Tacaná, Chis. *Geotermia*, Vol. 2, No. 1, pp. 5-22.
- Departamento de Exploración, 1989. Propuesta para la perforación exploratoria en la zona geotérmica de Araró, Mich. Informe 10/89, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.

- Departamento de Exploración, 1989b. Integración de estudios exploratorios de la zona geotérmica de La Soledad, Jal. Informe 12/89, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Departamento de Exploración, 1989c. Propuesta para la perforación exploratoria en la zona geotérmica del Volcán Ceboruco, Nayarit. Informe 13/89. Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Departamento de Exploración, 1990. Propuesta para la perforación exploratoria en la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores, Mich. Informe 1/90, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Departamento de Exploración, 1990b. Propuesta para la perforación exploratoria en la zona geotérmica de Los Negritos, Mich. Informe 2/90, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Departamento de Exploración, 1990c. Integración de estudios en la zona geotérmica de San Antonio el Bravo (Ojinaga), Chih. Informe 9/90. Depto. de Exploración, CFE, Inédito.
- Dickson, M.H., and M. Fanelli, 2003. *Geothermal energy: Utilization and technology*. Publicación de la UNESCO, Renewable Energy Series, París, 205 pp.
- EPRI, 1978. *Geothermal energy prospects for the next 50 years*. Special Report No. ER-611-SR of the Electric Power Research Institute for the World Energy Conference. 104 pp.
- Fernández Ruiz, J., 2000. *Derecho Administrativo*. Editorial Porrúa, S.A., México.
- García Estrada, G., 1989. Las técnicas de medida de flujo térmico en continentes, métodos opciones y su aplicación en México. *Geotermia*, Vol. 5. No. 3, pp. 375-410.
- Garg, S., 2010. A reexamination of USGS volumetric “Heat in Place” method. *Proceedings, Thirty-Six Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 31- February 2.
- Garg, S., Combs, J., 2010. Appropriate use of USGS volumetric “Heat in Place” method and Monte Carlo calculations. *Proceedings, Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, February 1-3.
- Gutiérrez Negrín, L., A. López Hernández, y J.L. Quijano León, 1989. Zonas geotérmicas de interés en México. *Geotermia*, Vol. 5, No. 3, pp. 283-346.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., V.H. Garduño-Monroy, and Z. Casarrubias-Unzueta, 2000. Tectonic Characteristics of the Geothermal Zone of Pathé, Mexico. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000. pp. 1189-1193.
- Herrera Franco, J.J. y G.R. Ramírez Silva, 1986. Reconocimiento geológico de la zona geotérmica El Orito-Los Borbollones, Jalisco. *Geotermia*, Vol. 2, No. 3, pp. 225-234.
- Hiriart G., S. Alcocer, R.M. Prol, and S. Espíndola, 2010. Submarine geothermics: Hydrothermal vents and electricity generation. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.

- Hiriart, G., and Sánchez, E., 1985. Thermodynamic Behavior of Simplified Geothermal Reservoirs. *Proceedings Tenth workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 22-24.
- Iglesias, E.R, y R.J. Torres, 2009. Primera estimación de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja en veinte estados de México. *Geotermia*, Vol. 22, No. 2, pp. 54-65.
- López Hernández, A., 1995. Soporte técnico para la localización de un pozo de gradiente en la zona geotérmica de Hervores de la Vega, Jal. Reporte GG-HV-005/95, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- López Hernández, A., 1996. Modelo geológico de un sistema hidrotermal no volcánico: San Bartolomé de los Baños, Gto., México. *Geotermia*, Vol. 12, No.1, pp. 19-32.
- Lorenzo Pulido, C., M. Flores Armenta y G. Ramírez Silva, 2011. Caracterización de un yacimiento de roca seca caliente en la zona geotérmica de Acoculco, Pue. *Geotermia*, Vol. 24, No. 1, pp. 59-69.
- Martínez Morales, R.I., 1999. *Derecho Administrativo*. Editorial Porrúa, S.A., México.
- Maciel Flores, R., 1985. Estudio geológico de la zona geotérmica de Piedras de Lumbre, Chih. Informe 52-85, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Mendoza Covarrubias, H., R. Tello Hinojosa, M. López Díaz and R.A. Sánchez Velasco, 2001. Rural electrification with a binary power plant: Maguarichic Project in Mexico. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 26, pp. 689-693.
- Mercado, S., 1976. The Geothermal Potential Evaluation of Mexico by Geothermal Chemistry. *Proceedings of the International Congress on Thermal Waters, Geothermal Energy and Vulcanism of the Mediterranean Area*. Atenas, Grecia, 1976.
- Mercado, S., J. Sequeiros, and H. Fernández, 1985. Low Enthalpy Geothermal Reservoirs in Mexico and Field Experimentation on Binary-Cycle Systems. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 9, pp. 523-526.
- Mercado, S., V.M. Arellano, R.M. Barragán, R. Hurtado, D. Nieva, E. Iglesias, G. Barroso, y H. Fernández, 1982. Diagnósticos y pronósticos sobre los aspectos científicos y tecnológicos de la geotermia como fuente de energía en México. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Informe IIE/FE-G37/1767/3, bajo contrato con CONACYT, 401 p. Inédito.
- Ordaz Méndez, C.A., Flores Armenta, M., y Ramírez Silva, G., 2011. Potencial geotérmico de la República Mexicana. *Geotermia*, Vol. 24-1, pp. 50-58.
- Ornelas Celis, A., 2008. *El régimen jurídico de los recursos geotérmicos*. En: *Desalación de agua con energías renovables*. Nava Escudero César Hiriart Le Bert Gerardo, Coordinadores. Instituto de Investigaciones Jurídicas, Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Polak, B.G., V.I. Kononov, E.M. Prasolov, I.V. Sharkov, R.M. Prol-Ledesma, A. González, A. Razo, and R. Molina-Berbeyer, 1985. First estimations of terrestrial heat flow in the TMVB and

adjacent areas based on isotopic composition of natural helium. *Geofísica Internacional*, Special volume on Mexican Volcanic Belt, S.P. Verma, ed., Vol. 24, No. 3, pp. 465-476.

- Prol-Ledesma, R.M., 1991. Terrestrial heat flow in Mexico. In: *Exploration of the Deep Continental Crust*, V. Cermák and L. Rybach, eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, pp. 475-485.
- Prol-Ledesma, R.M., C. Canet, P. Dando, and G. Hiriart, 2008. A new nascent spreading centres at the Wagner Basin in the northern Gulf of California: a possible geothermal resource? *Proceedings 30th New Zealand Geothermal Workshop*, Vol. 30, pp. 191-195.
- Sánchez Rubio, G., 1985. La erupción del 28-29 de marzo (1982) del volcán Chichonal: un breve estudio de su tefra. *Revista del Instituto de Geología*, UNAM, Vol. 6, No. 1, pp. 48-51.
- Serra Rojas A., 1977. *Derecho Administrativo*. Octava edición. Editorial Porrúa, S.A., México.
- Stefansson, V., 2005. World geothermal assessment. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, April 24-29, 2005.
- Taran, Y.A., and L. Peiffera, 2009. Hydrology, hydrochemistry and geothermal potential of El Chichón volcano-hydrothermal system, Mexico. *Geothermics*, 38-4, pp. 370-378.
- Tello H., E., y N. Velázquez M. 1994. Geoquímica de la zona de Pathé, Hidalgo. Informe GQ-012-1994. Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Tello Hinojosa, E., 1986. Química de los gases de Recubichi y Piedras de Lumbre, Chih. Informe 06-86, Depto. de Exploración, CFE. Inédito.
- Tester, J.W., B.J. Anderson, A.S. Batchelor, D.D. Blackwell, R. DiPippo, E.M. Drake, J. Garnish, B. Livesay, M.C. Moore, K. Nichols, S. Petty, M.N. Toksöks, and R.W. Veatch Jr., 2006. *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems on the United States in the 21st century*. Prepared by the Massachusetts Institute of Technology, under Idaho National Laboratory Subcontract No. 63 00019 for the U.S. Department of Energy, Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Geothermal Technologies, 358pp.
- Viggiano Guerra, J.C. y L.C.A. Gutiérrez-Negrín, 2003. Régimen de flujo hidrotermal en la zona geotérmica de Araró, Michoacán. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XVIII, No. 1, pp. 39-53.
- Viggiano Guerra, J.C. y L.C.A. Gutiérrez-Negrín, 2007. Estudio petrográfico y modelo conceptual preliminar de la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores, Michoacán, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XXII, No. 4, pp. 61-73.
- Viggiano Guerra, J.C., M. Flores Armenta y G. Ramírez Silva, 2011. Evolución del sistema geotérmico de Aocolco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones. *Geotermia*, Vol. 24, No. 1, pp. 14-24.
- Viggiano-Guerra, J.C., y L.C.A. Gutiérrez-Negrín, 1994. First results of deep exploratory drilling in the El Ceboruco geothermal zone. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 18, pp. 297-302.