

LAS POSIBLES FUENTES DE ENERGIA GEOTERMICA EN LA REPUBLICA MEXICANA

Por LUIS BLÁSQUEZ L.

INTRODUCCIÓN

Existe una regulación directa entre algunos manantiales termales y los receptáculos subterráneos que almacenan cantidades más o menos importantes de vapor, independientemente de los acuíferos de alta temperatura, que almacenan grandes cantidades de agua utilizable para la producción de energía.

Para la generación de energía, es sin duda muy importante la producción natural del vapor; pero por su mayor abundancia y distribución más amplia, las fuentes hipertermales merecen un detenido estudio ya que pueden indicar por su temperatura cierta conexión con receptáculos aprisionantes.

En general toda emisión de vapor presupone un receptáculo de acumulación en todo semejante a los que almacenan los hidrocarburos, debiéndose investigar su forma y posición con métodos semejantes a los empleados con este aceite mineral. Asimismo, las aguas termales sin vapor, presuponen acuíferos ordinarios del campo geohidrológico; por otra parte la confinación de los vapores puede hacerse dentro de la cautividad común de las aguas ascendentes, particularmente de las artesianas; pero sólo en casos muy particulares.

Ambas características merecen un estudio geológico-geofísico para inventariar los recursos de agua y vapores susceptibles de aplicación en la generación de energía, generalmente eléctrica, cuya magnitud puede ser de gran importancia económica.

PRODUCCION DE VAPOR

Se tienen datos de varios campos, donde hay emisiones de vapor, entre los que figuran los de los Estados de Michoacán, Guanajuato, Hidalgo y Baja California Norte.

En Michoacán es particularmente importante la región de la sierra de San Andrés donde hay desprendimientos de vapor, como en la laguna

de Los Azufres, El Chillador, El Currutaco y Las Humaredas. Los vapores y aguas hipertermales corresponden a fenómenos postparoxismales, naturalmente ligados al volcanismo reciente. Las rocas ígneas desde la andesita basáltica a la riolita y basalto, tienen un espesor considerable, entre 800 m. como mínimo y 2 000 m. como máximo. Esta formación está cortada por la falla de Ixtlán de los Hervores-Cuitzeo-San Andrés y otras paralelas y normales a ella y las aguas y vapores emergen a favor de esas fracturas; pero éstos posiblemente se almacenan en anticlinales de las formaciones marinas que subyacen a las rocas ígneas. Para captar los vapores se necesitarán perforaciones bastante profundas y en rocas muy duras, de tal manera que esta zona alta de la sierra de San Andrés, debe dejarse como reserva, para cuando se agoten zonas menos desventajosas.

La región de Ixtlán de los Hervores, con una altitud mucho menor (1 260 m.) y un espesor de rocas ígneas también mucho menor, es más favorable. También aquí la falla que llega a la sierra de San Andrés, corta las rocas ígneas y ofrece vías de salida a los vapores; pero es indispensable determinar por sondeos sísmicos y mecánicos, la forma y posición del receptáculo que encierra el vapor, que puede ser un domo o un anticlinal o cualquiera otra estructura a fin de localizar los pozos de acceso, de tal manera que puedan extraer la mayor cantidad posible de vapor y al mismo tiempo tengan la menor profundidad posible.

Es evidente que una explotación racional, sólo puede hacerse cuando se sabe la forma y posición del receptáculo, su capacidad y la medida de la renovación de sus recursos.

En el Estado de Guanajuato, las regiones más importantes son las de Comanjilla y San Bartolo, ambas de rocas ígneas, riolitas y basaltos, que con un espesor considerable descansan sobre las rocas marinas y plegadas del Cretácico, cuya profundidad y estructura sólo pueden conocerse por medio de sondeos mecánicos y geofísicos. Como en el caso de Ixtlán, conviene este conocimiento previo, a fin de evitar el peligro de situar pozos que lleguen a ser improductivos en breve plazo.

En el Estado de Hidalgo hay varias zonas productoras de vapor, siendo la más conocida la de Pathé¹ donde se han hecho varias perforaciones y de la que se tienen datos que permiten saber la variación de la temperatura en el pozo N° 1, habiéndose registrado 40° C. a los 4 m.; 69° a los 24 m.; 118° a los 90 m. con un ascenso constante de 0.7° C. por m.; 150° a los 158 m., con ascenso de 0.47° C. por m. o sean 2 m. por grado. De los 158 m. a los 238, antes de la aparición del vapor, la temperatura se mantuvo constante.

A los 237.80 m. brotó el vapor con una temperatura de 260 a 300° (l.p.20. Fig. 7). Puede verse claramente que hasta los 158 m. existen en la región, aguas freáticas o semiconfinadas en lavas basálticas, con altas temperaturas por el calentamiento de las aguas profundas que pasan a través de las fracturas, para emerger en los numerosos manantiales de Mothó, donde se hizo la perforación N° 1 y del antiguo géiser de Pathé, distante unos 900 m. al N. del pozo.

Es evidente que las aguas profundas se distribuyen con mayor profusión en los horizontes inferiores, de 160 a 90 m. de profundidad, con temperaturas de 150° abajo y 120° arriba. En seguida disminuye progresivamente la temperatura, denotando siempre la mezcla de las aguas freáticas normales con las calientes profundas.

La zona intermedia, con 80 m. de espesor, impermeable, consistente en tobos y conglomerados bien cementados, no registró aumento de temperatura, a pesar de su contacto inferior con el receptáculo de vapor, a relativamente alta temperatura y presión, ya que originalmente deberá ser de 60 atmósferas y sólo tiene alrededor de 10, denunciando pérdidas de presión por escapes de vapor en los acuíferos, los manantiales, el geiser y ahora los otros pozos, principalmente el N° 2, que provocó una gran disminución de la presión además de las descargas, que ha habido en todos los pozos, actualmente en número de tres, ocasionando la desaparición del geiser.

Si se llevara un registro manométrico automático en los pozos, se podría saber cómo varía la presión con las descargas en general y particularmente para una extracción constante en cada pozo y se podría calcular la duración probable de los depósitos de vapor y saber si hay regeneración anual, en qué épocas y a qué ritmo.

Cabe hacer notar que en el pozo N° 1 no se obtuvieron datos para calcular el gradiente geotérmico, toda vez que las mediciones de temperatura no se llevaron a cabo en terreno seco, sino en diversos acuíferos con mezcla más o menos importante de aguas profundas. La irregularidad mostrada, sin variación de temperatura en un tramo de 80 m. precisamente el más profundo, mientras que las variaciones más fuertes se realizan cerca de la superficie, demuestra que no se trata del gradiente geotérmico. Si se tuvieran datos igualmente detallados de las temperaturas en los pozos, se podrían hacer deducciones para el cálculo del gradiente geotérmico; pero aun así no determinarlo con certidumbre.

Al llegar al vapor, éste mostró una temperatura que normalmente habría alcanzado a 7,500 m. de profundidad, donde la presión sería de 1 973 atmósferas, impidiendo la formación del vapor, razón por la cual no puede atribuirse la temperatura, al gradiente geotérmico, como será mostrado más adelante.

Los pozos de Pathé sugieren la existencia de un receptáculo almacenador del vapor; pues estando todos situados prácticamente en una línea N-S, el menos profundo es el más septentrional y el más profundo el más austral. La construcción de una sección vertical pasando por los tres pozos, muestra que los puntos correspondientes a las profundidades a las que brotó el vapor en ellos, están situados sobre una línea inclinada hacia el sur y aunque no hay sondeos al norte del pozo 2, puede inferirse que posiblemente en el río o poco después de éste, continuando en la misma línea de los pozos, los puntos que se obtendrían perforando, hasta llegar al receptáculo del vapor, irían aumentando su profundidad. Esta inferencia se basa suponiendo un receptáculo en que, de continuar ascendiendo la línea del contacto entre la formación impermeable y la

permeable que aloja el vapor, llegaría a la superficie y daría salida a éste, de manera que no podría almacenarse, sino que saliendo al mismo paso que se generara, tendría que incorporarse al acuífero superior freático, aumentando su temperatura y produciendo manantiales de más o menos alta termalidad.

Es lógico que existiendo grandes cantidades de vapor almacenado, con escapes relativamente reducidos, tenga que existir por necesidad un receptáculo capaz de retenerlo, como en el caso de una caldera de vapor, donde se eleva la presión hasta donde alcanza la resistencia de las paredes de esa caldera o se gradúa de acuerdo con la conveniencia de esa generación de vapor. Presiones de 882 lb/pulg.², no pueden generarse sin un receptáculo aprisionante, como en el caso de los hidrocarburos, gases y aceites que se almacenan a grandes presiones y de aquí se deduce que la línea de contacto indicada, después de ascender de S a N desde el pozo más lejano hasta el río, deba descender en seguida, para formar el receptáculo de almacenamiento, que puede ser un domo, un anticlinal o la zona de contacto, siempre que sea permeable y esté cubierta por una formación impermeable, de una intrusión lacolítica, de stock o bosse con la forma apropiada para producir el receptáculo que encierre al vapor, cualquiera que sea su naturaleza.

En Baja California existen los llamados volcanes de lodo, que merecen un estudio geofísico de la naturaleza de las estructuras subterráneas, para conocer la forma y posición de los receptáculos que almacenan el vapor.

Se pasará ahora a formular algunas consideraciones sobre la producción del vapor.

El Sr. Ing. Luis F. de Anda, consigna varias opiniones sobre el origen del vapor subterráneo (l.p.11-15), que fundamentalmente suponen que proviene del enfriamiento y consolidación del magma. Que tal cosa es inadmisibles, se desprende del hecho obtenido por experimentación, de que la temperatura crítica del agua es de 365° a la presión crítica de 195 atmósferas. En la corteza terrestre, nunca coinciden temperatura y presión; pues con los gradientes geotérmicos normales, la temperatura de 365° se alcanza a 10,950 m. de profundidad, a la que la presión es de 2,866 atmósferas, muy superior a la crítica. Si la presión nos sirve de guía, 195 atmósferas corresponden a 745 m.; pero a esa profundidad la temperatura es de 24.8° C.

Es natural que no se pueda producir el vapor, sino en condiciones muy especiales; pues de lo contrario, en toda la extensión del mundo se estaría produciendo vapor, si además se admite que el magma contenga tan grandes cantidades de agua como las que se mencionan en el estudio aludido.

Estos volúmenes de agua son tan grandes, que si se admite un gasto hidráulico de 10 litros por segundo en los manantiales de Mothó inmediatos al pozo 1 y en el geiser de Pathé se tiene un volumen anual de 315,360 m.³ y suponiendo que daten de principios del Holoceno o sean 25,000 años el volumen sería de 7,900 millones de m.³ que proviniendo

de la consolidación de un magma que perdiera su agua con un contenido del 0.5 de su peso, supone una masa de 1.575×10^{12} toneladas que a la densidad de 2.7 corresponde a un volumen de 5.85×10^{11} millones de m.³ y un hemisferio de 14,100 m. de radio e igual profundidad.

Si la edad de la intrusión fuera de principios del Cuaternario, el volumen del agua segregada sería 100 veces mayor y el radio de la semiesfera alcanzaría todo el espesor de la litosfera.

Es inadmisibles que una masa de magma pueda eliminar su agua hasta su centro, la consolidación sería periférica, en un espesor de sólo unos cuantos metros y entonces el área sería tan grande, que sobrepasaría muchas veces la de México, y además las condiciones del desprendimiento de los gases y vapores no se realizarían por las grandes presiones de las partes internas del magma.

La explicación es obvia, ascendiendo el magma por fracturas u orificios, acarrea con ella la temperatura correspondiente a su original localización, en la base de la litosfera, perdiendo poco calor por la relativa rapidez del flujo. En efecto, en las lavas incandescentes, se han medido temperaturas de 1,300 a 2,000° propias de profundidades de 45,000 a 66,000 m. Hay que tomar en cuenta que el gradiente geotérmico no es constante, obedeciendo a la ley de la pérdida del calor por radiación. Así se ha calculado, que ese gradiente sería de 0.54 m. a los 39,900; de 4.96 a los 39,000; de 15.6 a los 30,000; de 31.0 a los 500; y de 31.1 cerca de la superficie.

Es con estos gradientes como se han calculado las temperaturas del magma en las zonas del sial, sifema, sima y en el substratum, desprendiéndose de esos cálculos, que sólo un magma emergente puede producir una alta temperatura, en zonas que entonces reúnen las condiciones críticas de temperatura y presión, convirtiendo el fenómeno de la producción del vapor en casos excepcionales, en vez de generales, limitado a las zonas volcánicas con la formación de geiseres, solfataras y fumarolas.

No obstante el ascenso del magma, no puede atribuirse el vapor a su agua congénita, dada su corta cantidad, debiéndose en su mayor parte a la afluencia de aguas meteóricas hasta las zonas periféricas de los magmas o sean sus aureolas térmicas, en las que el agua de esa procedencia toma elevadas temperaturas y después, asciende por la carga hidrostática o por diferencia de densidad en un medio de saturación, donde el agua que no está en contacto con la aureola tiene una temperatura muy inferior a la del contacto directo. Suponiendo una profundidad de 700 m., el agua tendría una temperatura normal de 23° C. con un gradiente geotérmico medio de 1° C. por cada 30 m.; pero en el contacto tendrá una temperatura mayor. Si ésta fuera de 285° podría formarse el vapor en esa misma zona; pero si fuera menor, supongamos de 180°, el vapor se produciría cuando la presión hidrostática disminuyera a 10 atmósferas o sea cuando el agua hubiera ascendido al nivel de 100 m. de profundidad y si se toma en cuenta la presión de las rocas, el vapor se formaría a una profundidad todavía menor.

El agua o el vapor, según la relación temperatura-presión emigrará por fracturas, contactos y medios permeables hasta quedar confinada en receptáculos que pueden corresponder a formas naturales de aprisionamiento, como domos o anticlinales; pero que también pueden ser formaciones permeables de cualquier forma hasta la de estratos o cuerpos horizontales continuos y hasta sinclinales, siempre que la permeabilidad disminuya lateralmente y hacia arriba para formar "trampas", o bien llenará cavidades en sifón, que producirán los geiseres típicos, como el "Old Faithful", o seguirá un camino sin aprisionamiento y podrá emerger en numerosos hervideros.

El continuo flujo del agua meteórica, determina con el tiempo el enfriamiento del magma, que es tanto más rápido cuanto es mayor el caudal del agua que transporta calorías y conforme desciende la temperatura, el agua llega más y más cerca de la masa intrusiva, cuya aureola térmica se va reduciendo hasta desaparecer por completo, en un tiempo que depende de la magnitud de la masa intrusiva, su profundidad, la conductividad térmica y otros muchos factores.

Es indudable que en las emisiones de vapores, intervienen las aguas juveniles; pero su cuantía es relativamente pequeña, habiendo algunos manantiales en los que estas aguas intervienen predominantemente y otros, la mayoría, que carecen de ellas.

Algunos autores mencionan a las aguas de cristalización como la fuente del vapor subterráneo. Esta opinión está más alejada aún de la realidad; puesto que está demostrado que su cantidad es insignificante, menos del 0.01%. Un lacolito con una área de unos 25 km.² con un radio de 2.5 km. tiene un volumen de 3.35×10^{10} m.³, suponiéndolo hemisférico y suponiendo que pueda producir una cantidad de agua igual a la de su superficie superior esférica, con un espesor máximo de 100 m., el volumen magmático de segregación sería de 3.92×10^9 m.³ y su masa con densidad 2.7, de 1.06×10^{10} toneladas, capaces de producir 20 lps durante un año 249 días.

La afluencia de agua al cuerpo intrusivo, puede hacerse en un acuífero confinado, con una presión hidráulica capaz de hacer brotar el agua sobre la superficie del terreno a ciertas cotas, aumentado por la presión del vapor si la forma del acuífero permite el desarrollo de esta presión, o si la presión de la rama de carga es superior a la tensión del vapor como posiblemente sea la mayoría de los casos.

En Pathé con una presión de 60 atmósferas se puede equilibrar una columna de agua libre de unos 600 m.; pero teniendo en cuenta la fricción, una columna de mucho menor altura, ya que aquélla es muy considerable en las arenas y material fino que constituye comúnmente los acuíferos.

El agua freática puede estar regida en su nivel por la contribución de las aguas confinadas, suministradas a favor de las fracturas que ofrezcan vías de escape a las aguas profundas y vapores que pueden ser los principales impulsores de las aguas confinadas, de tal manera, que a una disminución sensible de presión, corresponda un descenso percep-

tible del nivel o perfil freático. Claro está que estas aguas no pueden descender hasta el cuerpo intrusivo, tanto por la presión del vapor que escapa por las fracturas, como por la presión hidrostática del agua confinada, que por su circulación profunda y origen remoto, si pueda llegar a la zona o aureola térmica de la intrusión, por su mayor presión.

Las cantidades de vapor generadas, dependen de los gastos hidráulicos de los acuíferos que llevan sus aguas a las aureolas térmicas o zonas de contacto, según el caso, de los cuerpos intrusivos. Salta a la vista la dificultad de valorizar esas cantidades de agua; pero es muy favorable para una explotación, el hecho de que cantidades bastante pequeñas de agua, produzcan cantidades muy considerables de vapor. Para generar 25,000 Kw. o sean 34,000 caballos caldera, se requieren solamente unos 110 lps, que casi todos los acuíferos profundos son capaces de suministrar, en las condiciones requeridas para la producción del vapor.

Un punto muy importante, es la temperatura del cuerpo intrusivo, que decrece con rapidez relativa en muchos casos, como lo acredita el valle de Tenthousand smokes de Alaska y aquí en México las regiones de la sierra de San Andrés, Mich., y Comanjilla, Gto., donde con la descarga natural de los manantiales, la temperatura descendió notablemente hasta extinguirse los brotes de vapor y algunos manantiales. El primer caso se comprueba con la comparación de los manantiales visitados por el Dr. Waitz² en 1906 y los encontrados por el autor en 1956;³ el segundo entre las fuentes descritas por Humboldt en 1808⁴ y las encontradas por el autor en 1946.⁵

AGUAS HIPER Y MESOTERMALES

En el estudio del Ing. de Anda (l.p. 2) se hace notar que se ahorrarían \$900,000 al mes o sean \$10,950,000 al año, produciendo 25,000 Kw. o 219 millones de Kwh., al precio de \$0.05 Kwh. a base de combustible. Seguramente ese autor toma en cuenta la depreciación y amortización de la maquinaria y los gastos de conservación, operación y combustible, adoptando un amplio margen de seguridad. La producción de energía utilizando el vapor subterráneo, probablemente no supone la utilización de calderas, aunque es posible que se necesite elevar la temperatura y la presión por medio de ellas.

Una perspectiva digna de tomarse en cuenta la ofrecen las aguas hipertermales, ya que para alcanzar su temperatura se necesita el empleo de combustible, cuya importancia está en razón directa con la cantidad de agua empleada.

Para generar los 25,000 Kw. que toma de término de comparación el Ing. de Anda, con el supuesto del consumo de 16.2 litros de agua por Kwh. la cantidad de ésta sube a 3,570,000 m.³ y si su temperatura es de 100° las calorías suman 3.57×10^{11} (Kg/cal), que con una potencia calórica del petróleo de 11,600 K.cal, requieren 3.05×10^7 litros de petróleo que al precio de \$0.20 lt. importan \$6,100,000. Con una diferencia del agua usada de 85° C. la economía es de unos cinco millones de pesos.

Los manantiales termales tienen la ventaja de su mayor abundancia y más amplia distribución y además su durabilidad es mayor ya que se pueden explotar sin forzarlos; pues su producción acuífera no necesita ser muy alta.

Entre los manantiales que presentan buenas perspectivas para su aplicación en la energía termoelectrónica están en:

Jalisco: Laguna de Chapala, Agua Caliente de La Barca, de Zacoalco, de Ejutla, de Tamazula y de Tizapán, Atotonilco de Teocuitatlán y Hervor de Teuchitlán.

En Guanajuato: Ojo Grande de Atotonilco en San Miguel Allende, Cascabel y Atotonilquillo de Manuel Doblado, Lodos de Munguía de Irapuato, Hervidero de Apaseo, Caldera de Abasolo, Hervores de Huanímaro, Sotelo de Jaral de Progreso, Agua Caliente de Salvatierra, Moralityos de Celaya y Puroagüita de Jerécuaro.

En Hidalgo: Xindejé en Tasquillo, Ajacuba en Tetepango y Los Baños en Atotonilco Tula.

En México: El Bañito en Apasco, Los Baños en Chapa de Mota, Los Baños de Ixtlahuaca, Caro y San Bartolo de Jocotitlán, Salto en Valle de Bravo, San Pedro en Tenango del Valle, Anonas en Tejupilco y Barrón en Nicolás Romero.

En el Distrito Federal: El Peñón de los Baños.

En Tlaxcala: Atotonilco de Ixtacuixtla y Totolcingo de Cuapiaxtla.

En Puebla: Tlacomulco de Chignahuapan, Rancho Colorado y Paseo Azul de Puebla, Azufrutitla de Tianguismanalco, Atotonilco de Totimehuacán, Oxtotipan de Tepeaca, Alhuechica de Acatzingo, Hornos de Chiautla y Amatitlán de Albino Zertuche.

En Veracruz: Huizapan de Pajapan, Trinidad de Soconusco y El Carrizal de Axucoapan.

BIBLIOGRAFIA

1. *El campo de energía geotérmica de Pathé, Hidalgo*, por el Ing. Luis F. de Anda. Ingeniería, U.N.A.M. Vol. XXVII. Octubre de 1956.
2. *Phénomènes postparoxismiques du San Andrés*, por Paul Waitz. Guide des Excursions du Xe. Congrès Géologique International N° X. 1906. Mexique.
3. *Volcanismo Terciario y Reciente del Eje Volcánico de México. Excursión A-15*, por L. Blásquez L. XX Congreso Geológico Internacional, 1956. México.
4. *Ensayo Político de la Nueva España*, por Alejandro Von Humboldt. 1808.
5. *Los manantiales de Comanjilla, Gto.*, por Luis Blásquez L. Inst. Geol. de Méx. 1946 (inédito).

EL GRUPO VOLCANICO DE LAS TRES VIRGENES, MPIO. DE SANTA ROSALIA, TERRITORIO DE BAJA CALIFORNIA

Por los Ings. FEDERICO MOOSER y ARMANDO REYES LAGOS

EL GRUPO VOLCANICO DE LAS TRES VIRGENES

El grupo de volcanes denominado Las Tres Virgenes se sitúa a unos 20 Km. del Mar de Cortés, al noroeste de Santa Rosalía, B. C., en una región desértica y de escasa población. A la fecha ha sido muy poco estudiado.

Tres conos distintos, cada uno de morfología y características propias componen dicho grupo; quedan delineados, los tres, de noroeste a sureste.

El cono principal, notable por su gran altura (1,995 m.) y sus formas de relieve juvenil, tiene rasgos de un estrato-volcán; se sitúa en el sur del grupo, ofreciendo al viajero que transita la carretera de Santa Rosalía a San Ignacio, una vista imponente. De lejos, los costados de este cono son abruptos y casi regulares. Su cima, ancha e irregular, está compuesta por verdaderos cantiles y peñascos desgarrados, producto de la emisión de lava viscosa que surgió, probablemente, en el último cataclismo, reventando el cráter y el flanco noreste del volcán. Hacia el pie noreste escurrieron lavas basálticas bastante fluidas, emitidas en erupciones muy recientes; éstas sepultaron la base del cono central del grupo de Las Tres Virgenes. También al pie oriental y al pie meridional se extienden imponentes corrientes de lava basáltica que, debido a su formación reciente, forman un verdadero malpaís alrededor del volcán. A media altura sobre el costado sur y visible desde la carretera, se halla el resto de un pequeño cono adventicio, del que surgió una corriente de lava sumamente viscosa, que apenas alcanzó la base del cono.

El cono central del grupo, de menor altura que el anteriormente descrito, posee la forma de una pirámide regular, que termina en punta. La erosión obró visiblemente en sus flancos, que se hallan surcados radialmente desde media altura. Sobre su costado oriental descansan grandes depósitos de ceniza volcánica, en los que la erosión obró, formando una red de finas digitaciones. La formación de este cono es decididamente anterior a la del cono meridional, arriba descrito, no pudiéndose reconocer