

Distribución de Anomalías Geotérmicas en México: Una guía útil en la prospección geotérmica.

^{3,4,5}Luis E. González-Ruiz., ^{1,3}Eduardo González-Partida, ^{2,3}Víctor Hugo Garduño Monroy, ⁵Martínez, L., ⁵Pironon J. ³Erik Hugo Díaz-Carreño, ³David Yáñez-Dávila, ³Wendy Romero Rojas, ³Mary Carmen Romero-Rojas^{1,3}

¹Centro de Geociencias (CGEO), Universidad Nacional Autónoma de México, edgpa@gmail.com

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMICH)

³Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIEGEO).

⁴Geología, Minería, Consultoría S.A DE C.V (GEOMINCO) y Centro Nacional de Investigación Avanzada en Petrofísica, Qro., Qro. México.

⁵U.M.R.-7566-G2R, Nancy-Université, Boulevard des Aiguillettes, B.P. 239, F-54506 Vandœuvre-lès- Nancy, France.

Resumen.

Desde hace unos 45 años México figura como pionero y líder en el continente Americano en la explotación de recursos geotérmicos para la generación comercial de electricidad. De los 24 países en el mundo que en 2015 utilizan la energía geotérmica para generar electricidad, México ocupa el cuarto lugar en importancia. La geotermia es una tecnología relativamente madura, pero representa apenas el 0.4% de la generación de electricidad mundial.

México se encuentra en una de las regiones con mayor potencial geotérmico del mundo contando con numerosas manifestaciones superficiales, cuyo censo es objeto de este trabajo y tiene principalmente como finalidad publicar un “*censo de anomalías geotérmicas*” y su distribución espacial considerando los rasgos geológicos generales, para que sea utilizado por expertos a quienes esta información le pueda ser útil en la prospección geotérmica.

Los recursos geotérmicos Mexicanos se localizan preferentemente en los límites entre las diversas placas tectónicas en las que está fragmentada la litósfera, particularmente en los límites de tipo convergente, donde chocan entre sí dos placas y una se introduce debajo de la otra en un fenómeno conocido como subducción. La fusión de la placa subyacente forma cámaras magmáticas que eventualmente pueden actuar como fuentes de calor para dar lugar a sistemas geotérmicos. La gran mayoría de recursos térmicos es debido a la circulación de aguas profundas que emergen después de haber sido calentadas, y generalmente están relacionadas a grandes estructuras tectónicas.

El Cinturón Volcánico Transmexicano es una zona volcánicamente activa, que atraviesa al país de Este a Oeste, en la que se alojan el 79 por ciento de las anomalías termales conocidas en México. La segunda zona en importancia es el Noroccidente de México; Las anomalías geotermiales de esta región se alojan en gran parte en rocas de la Sierra Madre Occidental y en las Bajas Californias. La distribución geográfica de estas anomalías definen alineamientos paralelos a la línea de costa, es decir, en dirección NE-SE.

Palabras clave: anomalías geotérmicas, electricidad, México, Cinturón Volcánico Mexicano, Sierra Madre Occidental.

Abstract

Since 45 years ago Mexico as the pioneer and leader in the Americas in the exploitation of geothermal resources for the commercial generation of electricity. From the 24 countries in the world which use geothermal energy to generate electricity by 2015, Mexico ranks fourth in importance. Geothermal energy is a relatively mature technology, but represent just 0.4% of the world's electricity generation.

Mexico is located in one of the regions with the greatest geothermal potential in the world with numerous superficial manifestations, whose census is the subject of this work and has mainly intended publish a "census of geothermal anomalies" and its spatial geo-referenced whereas the general geological strokes, so that it is used by experts to whom this information may be useful in geothermal prospecting.

Geothermal resources Mexicans are preferably located in the limits between the various tectonic plates in which the lithosphere is fragmented, particularly within the limits of convergent type, where clash between two plates and one is introduced under the other in a phenomenon known as subduction, the formation of magma that eventually can act as sources of heat to give rise to geothermal systems is very common. Another large majority of thermal resources is due to the movement of deep water that after having been heated, and are usually related to large tectonic structures.

The Transmexicano volcanic belt is a volcanically active area, which crosses the country from East to West, where 79 percent of the thermal anomalies known in Mexico are located. The second important area is the Northwest of Mexico; anomalies in this region are housed in large part in rocks of the Sierra Madre Occidental and the California's States. The geographical distribution of these anomalies defined alignment parallel to the coastline, in NW-SE direction.

Key words: geothermal anomalies, electricity, Mexico, Mexican volcanic belt and Sierra Madre Occidental.

Introducción y Justificación.

Debido a su origen estelar, nuestro planeta Tierra contiene enormes cantidades de energía térmica. Esta energía almacenada y producida en el interior de la Tierra se llama Geotermia. Bajo tal perspectiva planetaria, la geotermia es un recurso renovable, virtualmente infinito, distribuido en el mundo más equitativamente que cualquier otra fuente de energía. Las manifestaciones termales superficiales son la prueba visual del calor encerrado en el interior de la Tierra (Prol Ledesma, R. M. 1986). Existen diferentes formas de generar calor, las principales son las cámaras magmáticas superficiales (7 a 8 Km de profundidad), el gradiente geotérmico natural de la tierra y la radioactividad.

Desde hace unos 45 años México figura como pionero y líder en el continente Americano en la explotación de recursos geotérmicos para la generación comercial de electricidad. De los 24 países en el mundo que en 2015 utilizan la energía geotérmica para generar electricidad, México ocupa el cuarto lugar en importancia (González-Partida y González Ruiz 2014). De acuerdo con Hernández Zúñiga (2014), la explotación de recursos geotérmicos para la producción de energía eléctrica es una tecnología relativamente madura que se contempla dentro de los programas de ahorro energético de más de 78 países incluido México, representando apenas el 0.4% de la generación eléctrica mundial (Hernández Zúñiga 2014). La Geotermia, además de ser una alternativa de generación de electricidad renovable y baja en carbono, permite producir energía de forma relativamente estable y puede ser suministrada de manera intermitente (Hernández Zúñiga 2014). México se encuentra en una de las regiones con mayor potencial geotérmico del mundo contando con numerosas manifestaciones superficiales, cuyo censo es objeto de este trabajo. En efecto, la energía geotérmica es un recurso energético, el cual puede ser explotable cuando las condiciones geológicas presentan condiciones favorables para que se acumule un fluido con alta temperatura y presión a una profundidad comercialmente recuperable, así, un campo geotérmico susceptible de aprovechamiento, ya sea para producción de vapor con fines de generación eléctrica o bien de agua caliente (baja entalpía) para fines no energéticos, debe tener como principales características: 1º).- Una anomalía térmica. 2º).- Un yacimiento constituido por rocas permeables donde circule fluido geotérmico, situado a profundidades a las que sea económica su explotación y 3º).- Una cobertura impermeable del yacimiento, que impida la pérdida de calor por circulación del fluido geotérmico hacia la superficie, es así que un yacimiento geotérmico debe estar formado por rocas de permeabilidad adecuada, con un volumen suficientemente grande para asegurar la explotación prolongada de fluidos geotérmicos; Además, debe estar localizado dentro de un sistema hidrológico que permita la recarga hidráulica del área en explotación. La delimitación del yacimiento es el problema más difícil de la exploración geotérmica, ya que frecuentemente existe una cubierta de rocas en superficie que a menudo impide el estudio directo de los substratos profundos. Las descargas de fluidos térmicos en superficie ó "*anomalías geotérmicas*" no necesariamente compiten con las tres características señaladas anteriormente, de hecho la mayoría de ellas no están ligadas a una cámara magmática aportadora

del calor, sino que son producto de una circulación profunda de aguas metéóricas calentadas por un gradiente térmico normal (33 °C por 1Km de profundidad), por esto, el presente catalogo de anomalías tiene principalmente como finalidad publicar un “*censo de anomalías geotérmicas*” y su distribución espacial considerando los rasgos geológicos generales, para que sea utilizado por expertos a quienes esta información le pueda ser útil en la prospección geotérmica, la cual comprende un conjunto de actividades e investigaciones para la obtención de información que permita formular científicamente modelos de sistemas geotérmicos en un sitio determinado. Los métodos de prospección geotérmica se aplican con la finalidad de evaluar las posibilidades geotérmicas de un lugar. La superficie de estudio será grande en las etapas de reconocimiento, en la escala de países (miles de km²), y se irá reduciendo paulatinamente hasta alcanzar escalas de decenas de km² en estudios de factibilidad (Torres y González 1993). Otro objetivo importante es la selección de áreas de interés, la determinación de esquemas y modelos geotérmicos y el planteamiento de las bases para exploraciones cada vez más detalladas, en este sentido las anomalías geotérmicas superficiales son una guía de exploración.

Metodología de trabajo.

Para conformar el censo de anomalías geotérmicas de México, se recurrió a un análisis bibliográfico, donde los principales trabajos consultados fueron: Alonso (1975), Mercado (1976), Mercado et. al., (1985), Prol-Ledesma (1986, 1991 y 2004), Torres Rodríguez y González-Partida (1993), Torres Rodríguez et. al., (1993 a, b, c, d), Torres Rodríguez et. al., (1994), Quinto et. al., (1995), González-Partida et. al., (2000 a, b), González-Partida et. al., (2001 a, b), González-Partida et. al., (2005), Iglesias-Rodríguez et. al., (2005), Maya-González, y Gutiérrez-Negrín (2007), Iglesias y Torres, R.J. (2009), López Hernández et. al., (2009), Canet et. al., (2010), Santoyo y Torres-Alvarado (2010), Aguilar-Dumas (2010), Hiriart et. al., (2011), Iglesias-Rodríguez et. al., (2011), Villanueva-Estrada et. al., (2011), Gutiérrez-Negrín (2012) y Hernández Zúñiga (2014). La información obtenida de estos documentos fue recopilada en dos tablas que se anexan a la presente las cuales contiene la localización geográfica con sus coordenadas correspondientes y nombre de la manifestación, así, cada anomalía fue graficada en planos geológicos regionales: Uno para el Noroeste de México y un segundo para la parte Central de México, lo que se conoce como Eje ó Cintura Neovolcanica Mexicana.

Aspectos generales de la Geotermia.

El calor de la Tierra es muy grande, pero sólo una parte de él puede ser explotado. Los volcanes, fuentes termales, fumarolas y otros fenómenos superficiales de este tipo hicieron pensar a los humanos en el pasado que el interior de la tierra es caliente. Sólo entre los siglos XVI y XVII, cuando por primera vez se excavaron las minas a profundidad de unos cientos de metros, fue evidente, desde la simple

sensación física, que la temperatura del subsuelo aumenta con la profundidad (Dickson y Fanelli 2004). La manifestación más espectacular del calor interno terráqueo, se observa durante el nacimiento explosivo y actividad de los volcanes. Pero otra forma más sutil y permanente ocurre a través del flujo térmico conductivo, medible con precisión en diferentes regiones de la superficie terrestre. En algunos lugares del globo, el gradiente geotérmico es varias veces mayor, encontrándose agua a temperaturas entre 200°C y 400°C en un rango de profundidades hasta de 3 km (Dickson y Fanelli 2004; Este rango permite la perforación económica de pozos productores de fluido de alta entalpía, apto para la generación de electricidad a través de turbinas. Como fuente de energía primaria, la geotermia no es solamente una esperanza para el futuro. Desde hace décadas tiene usos y propósitos múltiples: genera electricidad, enfría o calienta el espacio habitable, produce diversas materias primas, participa en agricultura, floricultura, hidroponía, acuicultura, en procesos industriales y de manufactura (Dickson y Fanelli 2004, Christopher y Armstead 1989). La energía geotérmica que utilizamos hoy día, proviene del calor transportado por agua subterránea, calentada por cámaras magmáticas situadas en sitios relacionados normalmente a zonas de contacto entre placas tectónicas y a volcanes. Esos lugares privilegiados se localizan en la corteza terrestre superior, dentro de un espesor de hasta 5 km de profundidad. Tres mil metros es el rango factible para la geotermia convencional. Sin embargo, el calor terrestre que aprovechan los países geotérmicos, es apenas un mínimo del recurso, pues corresponde a regiones anómalas someras, relativamente escasas: El potencial real de la geotermia a nivel planetario, se encuentra más abajo, muy lejos de ser cabalmente explotado (Dickson y Fanelli 2004). Hasta la fecha, el uso de esta energía se limita a las zonas donde las condiciones geológicas permiten el transporte de un fluido para "llevar" el calor de las formaciones profundas calientes a la superficie o cerca de ella, y formar lo que llamamos recursos geotérmicos. El escape de fluidos calientes hasta la superficie constituyen las manifestaciones geotérmicas (Christopher y Armstead 1989). Los campos geotérmicos en México se pueden clasificar desde el punto de vista de su contenido energético en tres tipos: 1º).- Sistemas de baja entalpía (50 a 140 °C); 2º).- Sistemas de moderada entalpía (140 a 200 °C); y 3º).- Sistemas de alta entalpía (200 a 350 °C).

Los recursos geotérmicos Mexicanos.

Los recursos geotérmicos de México se localizan preferentemente en los límites entre las diversas placas tectónicas en las que está fragmentada la capa sólida más externa del planeta conocida como litósfera (Dickson y Fanelli 2004). Particularmente en los límites de tipo convergente, donde chocan entre sí dos placas y una se introduce debajo de la otra en un fenómeno conocido como subducción. La fusión de la placa subyacente forma cámaras magmáticas que eventualmente pueden actuar como fuentes de calor para dar lugar a sistemas geotérmicos. La gran mayoría de recursos térmicos es debido a la circulación de aguas profundas que emergen después de haber sido calentadas, y generalmente

están relacionadas a grandes estructuras tectónicas, así en los primeros, la fuente de calor es representada por intrusiones magmáticas; dichas intrusiones se presentan, principalmente, en ambientes geológicos específicos, tales como (Torres et. al., 1993): crestas oceánicas (zonas de expansión), márgenes convergentes (zonas de subducción), y los segundos en "rifts continentales" (zonas de adelgazamiento de la corteza) y anomalías térmicas dentro de las placas. Asimismo, estos sistemas están caracterizados por la circulación natural de un fluido donde el calor es transportado por el mismo fluido (Torres et. al.,1993).

Las temperaturas superficiales medidas en las manifestaciones de aguas termales de México (mayores a 30 °C) tuvieron un valor promedio de 41°C. El 77% de las manifestaciones termales estudiadas corresponden a manantiales tibios de bajas concentraciones iónicas y baja entalpía. El 18 % son manantiales calientes de concentraciones bajas a intermedias y entalpías medias. El 5 % de las manifestaciones restantes presentan características de sistemas de alta o muy alta entalpía con concentraciones intermedias a altas. Los sistemas correspondientes a estas características son los de agua caliente y de vapor dominante (Torres et. al.,1993). La utilización del recurso geotérmico depende del grado de conocimiento que se tenga de éste y de la cantidad y facilidad de extracción de la energía en cada lugar reconocido. Con la finalidad de realizar estimaciones económicas y de factibilidad técnica, se hace necesario contar con información de índole física, química, geográfica, económica y geológica, entre otras, que valorada en conjunto permitan definir estrategias de desarrollo para la energía geotérmica.

Anomalías geotérmicas del Noroccidente de México.

Las anomalías geotermales de esta región se alojan en gran parte en rocas de la Sierra Madre Occidental y en las Bajas Californias (figura 1 y tabla 1 (anexa)). La distribución geográfica de estas anomalías define alineamientos paralelos a la línea de costa, es decir, en dirección NE-SE. La mayoría de tales alineamientos coinciden con fallas. La cresta oceánica de expansión activa en el Golfo de California y Sistema de Fallas de San Andrés pertenecen a la Cresta del Pacífico Oriental, límite entre las Placas del Pacífico y de Norteamérica. En esta zona de Norteamérica, la Cresta del Pacífico ha chocado contra el continente, separando la península de Baja California de las costas actuales de México. El proceso se inició hace unos 12 millones de años y en la actualidad existe un proceso de "oceanificación" dentro del Golfo de California (Mar de Cortés). El proceso se desarrolla mediante la creación de corteza oceánica en las crestas de expansión (por ejemplo, la Cuenca de Guaymas), las cuales se conectan con otras a lo largo de estructuras escalonadas formando fallas de transformación. Precisamente una de estas fallas, es la que forma el Sistema de San Andrés que penetra al continente por la desembocadura del Río Colorado, cruza por la ciudad de Los Ángeles para salir nuevamente al Océano Pacífico por la ciudad de San Francisco. Como consecuencia de la apertura del Golfo de Baja California y la formación de los sistemas de fallas transformantes (con rumbo predominante Noroeste-

Sureste), se han emplazado estructuras volcánicas a lo largo de las discontinuidades corticales generadas por ellas, algunas de las cuales han evolucionado a sistemas hidrotermales activos. El mejor ejemplo de este fenómeno es el Campo Geotérmico de Cerro Prieto (Baja California) en el que hay evidencias de volcanismo e hidrotermalismo actuales. Se conocen, también, localidades geotermales a lo largo de las costas de los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit. Entre ellas se encuentran: San Luis Río Colorado y Sonorita (Sonora), Guamúchil y Topolobampo (Sinaloa), y la zona volcánica de Tepic-Acaponeta, Ixtlan del Río (Nayarit) y Mascota (Jalisco). Los fluidos característicos de la zona son sódico-clorurados. También se han determinado sódico-bicarbonatados, aunque con menor frecuencia. Las manifestaciones termales a lo largo de la Sierra Madre Occidental adquieren orientaciones características definiendo alineamientos bien marcados en dirección Nornoroeste-Sursureste, o bien, Norte-Sur, paralelas a la antigua zona de subducción, inactiva desde hace 10 millones de años. Estas estructuras se distinguen claramente de las de rumbo Noroeste-Sureste que predominan en las zonas costeras colindantes. Los alineamientos se relacionan con fallas normales que definen un sistema de fosas de tipo distensivo. Las más importantes se han observado en los estados de Sonora, Durango y Chihuahua, alcanzando longitudes de más de 300 km, con lo que evidencian su naturaleza regional. La mayoría de las manifestaciones de aguas termales coinciden con trazas de fallas y fracturas reconocidas en el campo. Otras fuentes termales se alinean en las direcciones anotadas, pero sin que existan evidencias estructurales observables. En el estado de Chihuahua se conocen cerca de 53 manifestaciones termales, algunas de las más importantes son las que afloran en los municipios de Nuevo Casas Grandes, Madera, Temosachic, Guachochi, Maguarichi y Ocampo. Las fuentes termales que afloran en la zona oriental del estado, pertenecen a la Provincia Geotérmica de la Sierra Madre Oriental y al Rift del Río Bravo. La Baja California Norte contiene cerca del tres por ciento de las manifestaciones termales conocidas, la mayoría asociadas al Sistema de Fallas de San Andrés.

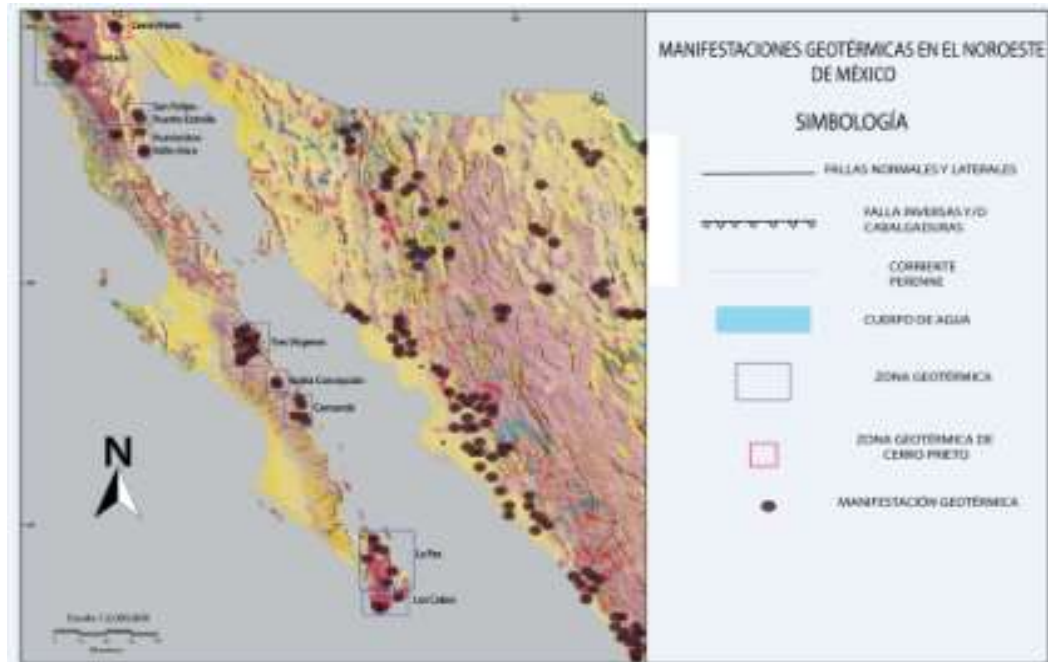


Figura 1.- Anomalías geotérmicas del Nor-Occidente de México. Geología tomada de Universidad Politécnica de Baja California (2011) y del Servicio Geológico Mexicano (2007).

Anomalías geotérmicas de la Cintura Volcánica Mexicana.

Su origen está relacionado con la subducción oblicua de la Placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica (figura 2 y tabla 2 (anexo)). El volcanismo es del tipo andesítico-basáltico con algunos centros de evolución a rocas ácidas. Los tipos de volcanismo dentro de la región incluyen: estratovolcanes poligenéticos, volcanes monogenéticos, calderas y derrames fisurales. La mayor concentración de focos termales se ubica en el borde norte del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), coincidiendo con la presencia de calderas en esta porción, como ejemplo, se citan: la Caldera de La Primavera (Jalisco) y la de Los Humeros y Acoculco (Puebla). En contraparte, el borde sur se caracteriza por la presencia de los grandes estratovolcanes (Colima, Toluca, Popocatépetl, Iztaccíhuatl y Orizaba) y un menor número de manifestaciones termales. Fuera del CVM existen algunas manifestaciones como en las Costas del Pacífico Sur ubicadas en los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas, constituyendo el 2% de las localidades conocidas. También son notorios los agrupamientos de datos en las regiones de los volcanes de El Chichón y Tacaná.

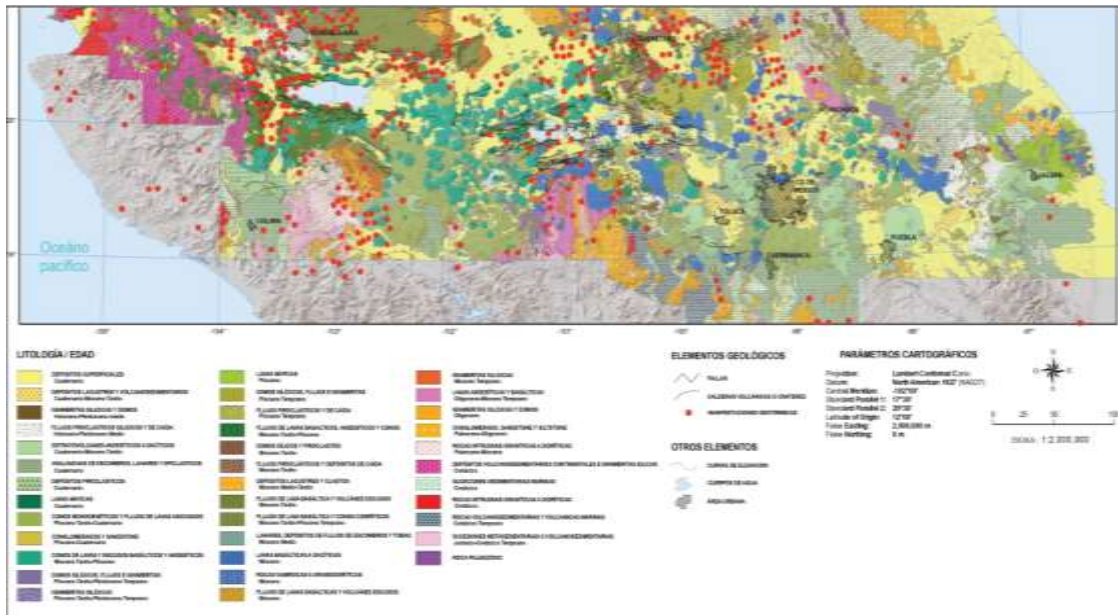


Figura 2.- Anomalías geotérmicas de la Cintura Volcánica Mexicana. Geología tomada de Ferrari, et. al., (2012) y Gómez-Tuena et. al., (2007 a y 2007b).

La Cintura Volcánica Mexicana es una zona volcánicamente activa, que atraviesa al país de Este a Oeste, en la que se alojan el 79% de las anomalías termales conocidas en México: La distribución de focos geotermales presenta dos subregiones, y corresponden al *Agrupamiento Sur* (estado de Michoacán), constituido por las anomalías cercanas a los lagos de Yuriria, Cuitzeo y Pátzcuaro, alojadas todas en depresiones tectónicas. La segunda región denominada *Porción Central y Occidental*, esta constituida por las manifestaciones en los estados de Nayarit, Jalisco, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Puebla y Veracruz. Dentro de esta subprovincia, los focos termales se asocian a las depresiones tectónicas del occidente del Cinturón Volcánico Transmexicano (Lagunas de: Chapala, Sayula, Zapotlán y Atotonilco, entre otras), así como a lo largo de los ríos San Pedro Mezquital, Grande de Santiago, Ameca y Juchipila. Hacia el Centro y Este del Cinturón Volcánico Transmexicano las anomalías termales se asocian a fracturamiento Norte-Sur y Este-Oeste, y se les encuentra, indistintamente, en diferentes estructuras volcánicas, incluyendo calderas, volcanes mono-genéticos y estratovolcanes. La estrecha relación entre el Cinturón Volcánico Transmexicano y las anomalías termales, hace suponer que, al menos las localizadas sobre dicha estructura, tienen relación con procesos volcánicos. La disposición de las anomalías termales en los centros volcánicos que van desde el Volcán de El Arenal (Jalisco) hasta Tepic (Nayarit), muestran una estrecha vinculación con el curso de los ríos. A lo largo de esta región, las manifestaciones termales se localizan en los cauces de los ríos: San Pedro Mezquital, Grande de Santiago, Ameca, Los Patitos, Juchipila, Herrería y Armería, entre otros.

Conclusiones.

México es en una de las regiones con mayor potencial geotérmico del mundo contando con numerosas manifestaciones superficiales, de las cuales más de 1300 han sido censadas en este trabajo. La región y provincia geológica con mayor potencialidad de exploración geotérmica es la Cintura Volcánica Mexicana. Le sigue en importancia el Noroccidente de México: Las anomalías geotermales de esta región se alojan en gran parte en rocas de la Sierra Madre Occidental y en las Bajas Californias, relacionándose a alineamientos paralelos a la línea de costa, con dirección preferencial NW-SE.

En la Cintura Volcánica Mexicana los principales patrones estructurales donde están las anomalías termales presentan dirección preferencial W-E, presentándose en sistemas de "horst y graben" calderas y fracturamiento profundo.

Agradecimientos.

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y la Secretaría de Energía (SENER), a través del Fondo Sectorial CONACyT-SENER-Sustentabilidad Energética, han lanzado la convocatoria para crear el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIEGEO) todo bajo un proyecto numerado 08 - 207032, a quien agradecemos por su apoyo en la elaboración de este documento. Igualmente manifestamos nuestro agradecimiento a los revisores a nóminas de este trabajo.

Bibliografía.

Prol Ledesma, R. M. 1986. El calor de la Tierra. Fondo de Cultura Económica S. E. P., 99 p.

González-Partida E., González Ruiz L.E. 2014. La Energía Geotérmica en México: Algunos aspectos geológicos de los principales campos productores de energía. Actas INAGEQ Vol. 20, N° 1, pp, 52-58.

Hernández Zúñiga 2014. Potencial geotérmico de México. Conferencia dictada en noviembre del 2014, Secretaría de Energía (SENER), Mexico D. F. Presentación en PDF 10 láminas.

Alonso, H. (1975). Potencial geotérmico de la República Mexicana. *Second united nations Symposium on the Development and use of Geothermal Resources*, V1, pp, 17-24.

Mercado, S. (1976). The Geothermal Potential Evaluation of Mexico by Geothermal Chemistry. In: *Proceedings of the International Congress on Thermal Waters, Geothermal Energy and Vulcanism of the Mediterranean Area*, Atenas, Grecia, 19 p.

Mercado, S., Sequeiros, J., and Fernández, H. (1985). Low Enthalpy Geothermal Reservoirs in Mexico and Field Experimentation on Binary-Cycle Systems. *Geothermal Resources Council Transactions*, V 9, pp, 523-526.

Prol-Ledesma, R.M., (1991). Terrestrial heat flow in Mexico, in: Cremák, V., Rybach, L. (Eds.), *Exploration of the Deep Continental Crust*. Springer-Verlag Berlin, pp, 475-485.

Prol-Ledesma, R.M., Canet, C., Torres-Vera, M.A., Forrest, M.J., and Armienta, M.A. (2004). Vent fluid chemistry in Bahía Concepción coastal submarine hydrothermal system, Baja California Sur, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, V 137, pp, 311-328.

Torres Rodríguez y González-Partida E., 1993. Métodos de Prospección Geotérmica In: Torres Rodríguez V., "Geotermia en México". Programa Universitario de Energía; Coordinación de la Investigación Científica – UNAM, pp, 23-30, ISBN 968-36-3444-3.

Torres Rodríguez V., Venegas Salgado S., Herrera Franco J., y González-Partida E., 1993a. Manifestaciones Termales de la República Mexicana. In: Torres Rodríguez V., "Geotermia en México". Programa Universitario de Energía; Coordinación de la Investigación Científica – UNAM, pp, 1-79, ISBN 968-36-3444-

3.

Torres Rodríguez V., Venegas Salgado S., Herrera Franco J., y González-Partida E., 1993b. Análisis Geo estadístico de las propiedades físicas y geológicas de aguas termales de México. *In: Torres Rodríguez V., "Geotermia en México". Programa Universitario de Energía; Coordinación de la Investigación Científica – UNAM, pp, 80- 103. ISBN 968-36-3444-3.*

Torres Rodríguez V., Venegas Salgado S., Herrera Franco J., y González-Partida E., 1993c. Composición geoquímica y geotermómetros de aguas termales de la Republica Mexicana .*In: Torres Rodríguez V., "Geotermia en México". Programa Universitario de Energía; Coordinación de la Investigación Científica – UNAM, pp, 104 - 125. ISBN 968-36-3444-3.*

Torres Rodríguez V., Arellano Gómez V. y González-Partida E., 1993d. Geotermia en México, *In: Torres Rodríguez V., "Geotermia en México". Programa Universitario de Energía; Coordinación de la Investigación Científica – UNAM, pp,139 - 164. ISBN 968-36-3444-3.*

Torres Rodríguez V., Birkle P. González-Partida E. 1994. Procesamiento digital de imágenes: percepción remota y centrales de potencia. *Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas, V 16, pp, 11-18.*

Quinto A., Santoyo G., Torres R., González-Partida E. 1995. Estudio químico-ambiental de los efluentes naturales producidos en la zona geotérmica de Acozulco, Pue. *Ingeniería Hidráulica en México, X, pp, 21-27.*

González-Partida E., P. Birkle y Torres-Alvarado. 2000 a. Evolution of the hydrothermal system at the geothermal field of Los Azufres México, based on fluid inclusions, isotopic and petrologic. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 104, pp, 277-296.*

González-Partida E., Tello Hinojosa E. y Pal Verma. 2000 b. Análisis geoquímico e isotópico de aguas geotérmicas y manantiales para definir el estado de equilibrio agua-roca del reservorio de los Azufres, Mich., México. *Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XV/3, pp, 89-99.*

González-Partida E., Tello Hinojosa E. y Pal Verma. 2001 a. Características

geoquímicas de las aguas del reservorio del sistema hidrotermal actual de las Tres Vírgenes B. C. S. México. *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI/1, pp, 47-56.

González-Partida E., Tello Hinojosa E. y Pal Verma. 2001b. Interacción agua geotérmica-manantiales en el campo geotérmico de Los Humeros Puebla México. *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI/2, pp, 185-194.

González-Partida E., Carrillo-Chávez, Levresse G., Tritlla J., Tello-Hinojosa E., Venegas-Salgado S., Ramírez-Silva G., M. Pal Verma, and Camprubi A. 2005. Hydro-geochemical and isotopic fluid evolution of the los Azufres Geothermal field, Central México. *Applied Geochemistry*, 20, pp, 23-39.

Pal Verma S., Kailasa Pandarinath, E. Santoyo, E. González - González-Partida E. I. Torres-Alvarado, E. Tello-Hinojosa. 2006. Fluid chemistry and temperatures prior to exploitation at the Las Tres Vírgenes geothermal field, México. *Geothermics*. V 35, pp, 156-180.

López Hernández A., García Estrada G., Aguirre Díaz G., González Partida E., Palma Guzman H., Quijano León JL. 2009. Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acozul Caldera Complex México: Exploratory studies. *Geothermics*. V 4, pp, 225-237.

Iglesias-Rodríguez, E., Arellano-Gómez, V., and Torres, R.J. (2005). Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la geotermia en México. In: *Informe IIE/11/3753/I 01/P*, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 63 p.

Maya-González, R., and Gutiérrez-Negrín, L.C.A. (2007). Recursos Geotérmicos para Generar Electricidad en México. *Revista Digital Universitaria UNAM*, 8 (12): 13 p.

Iglesias, E.R., and Torres, R.J. (2009). Primera estimación de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja en veinte estados de México. *Geotermia*, V 22 (2), pp, 54-65.

Santoyo, E., and Torres-Alvarado, I.S. (2010). Escenario Futuro de Explotación de la Energía Geotérmica: Hacia un Desarrollo Sustentable. *Revista Digital Universitaria UNAM*, V11 (10), 26 p.

Carles Canet, Lilia Arena, Eduardo González-Partida, Teresa Pi, Rosa María Prol-Ledesma, Sara I. Franco, Ruth E. Villanueva Estrada, Antoni Campruby, Genmal Ramirez Silva, A. Lopez Hernandez. 2010. A statistic base method for the short-wave infrared spectral analysis of altered rocks: An example from the Acoculco Caldera, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geochemical Exploration*, V. 105, pp, 1-10.

Aguilar-Dumas, A. (2010). Situación Actual y Alternativas de Exploración y Explotación en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, V 23 (2), pp, 33-40.

Hiriart, L.B.G., Gutiérrez-Negrín, L.C.A., Quijano-León, J.L., Ornelas-Celis, A., Espíndola, S., and Hernández, I. (2011). Evaluación de la Energía Geotérmica en México. In: *Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía*, D.F., México, 167 p.

Iglesias, E.R., Torres, R.J., Martínez-Estrella, J.I., and Reyes-Picasso, N. (2011). Resumen de la evaluación 2010 de los recursos geotérmicos mexicanos de temperatura intermedia a baja. *Geotermia*, V 24 (2), pp, 39-48.

Villanueva-Estrada, R., Prol-Ledesma R. M, Rodríguez-Díaz A, Carles Canet & González-Partida E. 2011: .Mixing vs Boiling process in a shallow submarine hydrothermal system of Bahía Concepción, México. *International Geology Review* V 1, pp, 1-13.

Gutiérrez-Negrín, L.C.A. (2012). Update of the Geothermal Electric Potential in México. *Geothermal Resources Council Transactions*, V 36, pp, 671-677.

Dickson, M. y Fanelli, M., 2004. Cos'è l'energia geotermica. Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR , 62 p.

Christopher, H. and H. Armstead, *Energia geotérmica*, Editorial Límusa, México, D. F., 1989, 504 p.

Universidad Politécnica de Baja California., 2011. Evaluación de los recursos geotérmicos de baja entalpía de la península de Baja California, México. Reporte final. 94 p.

Servicio Geológico Mexicano., 2007. Carta geológica de la República Mexicana. Escala 1:2,000,000.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, M.T., Manea, V., Manea, M., 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523 (2012), pp. 122-149.

Gómez-Tuena, A., Langmuir, C.H., Goldstein, S.L., Straub, S.M., Ortega-Gutiérrez, F., 2007a. Geochemical evidence for slab meeting in the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Petrology* 48, 537–562.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., 2007b. Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. In: Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, Á.F. (Eds.), *Geology of México: celebrating the Centenary of the Geological Society of México: Geological Society of America Special Paper*, 422, pp. 1–53.