

Sismicidad en el complejo volcánico de Las Tres Vírgenes, B. C. S.

Cecilia Lorenzo Pulido, Jorge Soto Peredo

*Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Subgerencia de Estudios,
Departamento de Exploración. e-mail: jorge.soto04@cfe.gob.mx*

Resumen

La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) tiene como función sustantiva "Dirigir la exploración y el desarrollo de los campos y zonas geotérmicas del país y los estudios necesarios para ello, incluyendo la documentación requerida para la aprobación de los proyectos viables por las autoridades correspondientes, a fin de aprovechar los recursos geotérmicos del país en la generación de energía eléctrica." Por lo que se llevan a cabo diversos estudios para tal fin; uno de ellos es llevar a cabo el monitoreo de la actividad sísmica pasiva.

En este trabajo se han empleado más de 550 eventos sísmicos localizados por una red de sismómetros instalados en los alrededores del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes B. C. S. Estos datos fueron recopilados en diferentes años en el período que comprende desde el año 2000 al 2011. El análisis de la sismicidad ha permitido, relacionar esta actividad con un sistema hidrotermal de alta temperatura, tomando como base la geología del subsuelo proporcionada por los pozos. Asociando los sismos registrados con zonas permeables en el subsuelo, que a su vez estarían asociadas a fallas geológicas o zonas de fracturamiento, que puedan estar relacionadas con el yacimiento geotérmico.

El análisis espacial de la sismicidad en la realización del Modelo Geotérmico Conceptual en 2010 (Gómez et al, 2010) mostró una tendencia en los eventos sísmicos que podría estar relacionada con la probable caracterización de la cámara magmática del llamado complejo volcánico de Las Tres Vírgenes B.C.S.

Al llevar a cabo la actualización de la información para el año 2012, la tendencia señalada en 2010 pudo corroborarse, señalándose como una brecha sísmica por debajo de los 5500 mbnm, con un alineamiento de la sismicidad con forma redondeada, como si se tratara de la cima de un lacolito.

Palabras clave: Sísmica pasiva, cámara magmática, Las Tres Vírgenes, complejo volcánico.

Abstract

The **Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG)** has as a substantive role "Direct the exploration and development of fields and geothermal areas in the country and the necessary studies to do so, including the documentation required for the adoption of viable projects by the relevant authorities, in order to take advantage of geothermal resources of the country in the generation of electric power." So several studies for this purpose are carried out; one of them is to carry out the monitoring of the passive seismic activity.

In this work more than 550 seismic events located by a network of seismometers installed in the vicinity of the volcanic complex of Las Tres Vírgenes B. C. S. have been employed. These data were collected in different years in the period that comprises from the year 2000 to 2011. The analysis of seismicity has allowed relating the activity with a high temperature hydrothermal system, on the basis of the geology of the subsurface provided by drilled wells. By associating the earthquakes registered with permeable zones in the subsoil, which at the same time would

be associated to geological faults or fracture zones, inside the geothermal reservoir.

Spatial analysis of seismicity as an input for the Conceptual geothermal modeling of the field (Gómez et al, 2010) showed a trend in seismic events that could be related to the magma chamber of the so-called volcanic complex of Las Tres Vírgenes B.C.S.

When updating with the 2012 information, the trend indicated in 2010 could be corroborated, pointing as a seismic gap below the 5500 musl, with an alignment of the seismicity with rounded shape, as if it were the top of a laccolith.

Keywords: passive seismic, magma chamber, Las Tres Vírgenes, volcanic complex.

1. Introducción

El campo geotérmico Las Tres Vírgenes actualmente tiene una capacidad de generación eléctrica instalada de 10 MW a través de 2 unidades de 5 MW cada una. La extracción del recurso natural con fines comerciales inició en el año 2001.

La perforación del primer pozo exploratorio, LV-2, inició en octubre de 1986, a la fecha se han perforado en este campo 11 pozos, cuatro pozos productores, tres inyectores y cuatro pozos exploratorios.

El último Modelo Geotérmico Conceptual fue elaborado por la GPG, en el año 2010, con el fin de comprobar cuál sería el modelo conceptual más apropiado y preciso que se usaría como base para el modelo numérico.

2. Antecedentes

El monitoreo de la actividad microsísmica pasiva en el Campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes, B. C. S., tiene como propósito identificar fallas geológicas activas, zonas fracturadas o permeables, y la relación que presente con la inyección de agua geotérmica y/o extracción de fluido geotérmico en el subsuelo, que puedan estar relacionadas con el yacimiento geotérmico. Estas zonas pueden manifestarse propiamente debido a la ocurrencia de eventos sísmicos muy pequeños, denominados microsismos, los cuales se originan debido al movimiento de los fluidos geotérmicos o la reactivación de sistemas de fallas preexistentes.

La GPG considera al monitoreo de la actividad sísmica pasiva como un método de exploración relevante. Por lo que para la recopilación de este tipo de datos, se ha apoyado en la capacidad y experiencia de expertos sismólogos mexicanos, los cuales han sido los responsables del mantenimiento y operación de los equipos correspondientes, así como de la recolección y procesamiento de datos sísmicos, así como del análisis de los mismos. Con el objetivo de aprovechar esta información como sustento de nuevas propuestas de pozos.

En el Campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes, se han instalado redes sísmicas en diferentes periodos de tiempo (Rodríguez, 2000; Lermo et al. 2004; Lermo et al. 2006; Lermo et al. 2008; Lermo et al. 2009; Lermo et al. 2010, y Lermo et al. 2011), lo que ha permitido, mediante el análisis de los datos sísmicos registrados, poder relacionar la microsismicidad con un sistema hidrotermal de alta temperatura, teniendo como referencia la geología del subsuelo proporcionada por los pozos.

Esta actividad microsísmica, sugiere por los patrones espaciales que presenta en general, que pudiera estar relacionada con sistemas de fallas activas y/o con el movimiento de fluidos dentro del yacimiento geotérmico.

2.1. Región del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes

El campo geotérmico Las Tres Vírgenes, se encuentra en la parte norte del estado de Baja California Sur y se localiza al noroeste 34 km en línea recta, a partir de la población de Santa Rosalía, B.C.S. El área del presente estudio contempla la zona de los volcanes La Virgen, El Azufre, El Viejo, El Partido y su periferia, una superficie de 24 km², ver Figura 1.

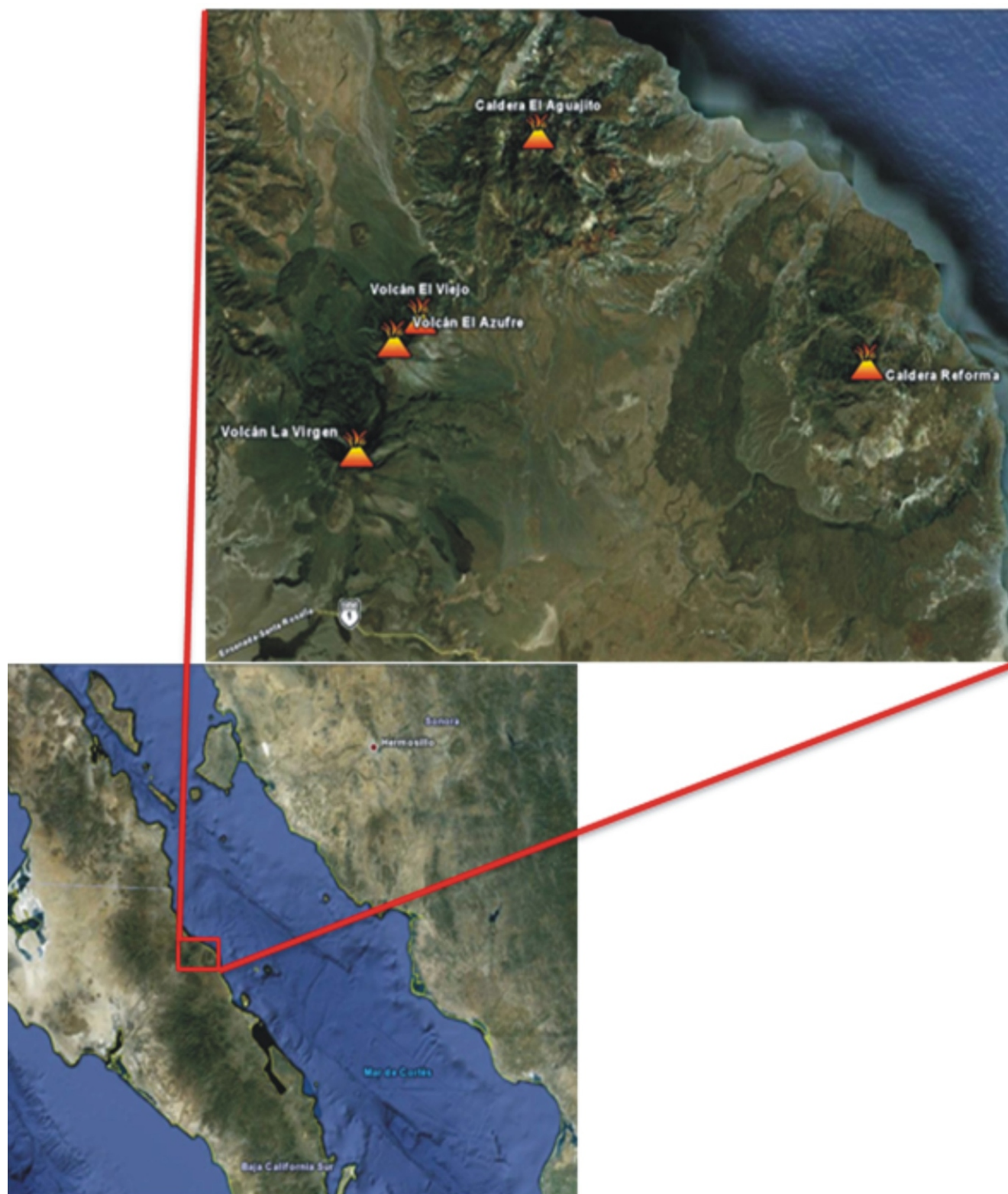


Figura 1.- Mapa de ubicación de la zona de estudio

3. Geología

En el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes y su periferia, se han realizado diversos estudios geológicos a partir de 1981, con ellos ha sido posible definir los aspectos tectónicos, volcánicos, sedimentarios, estratigráficos, estructurales y de mineralogía hidrotermal de la zona.

3.1. Deformación tectónica

Las fallas transformes que dieron origen a la formación de la península de Baja California se desarrollaron a partir del choque entre la Dorsal del Pacífico y la zona de subducción existente hace 10 m.a.

En el Mioceno Medio se generó una depresión elongada, como parte de este mismo periodo de transformación, limitada por grandes zonas de falla con dirección NW-SE. Esto marca el inicio de la apertura del Golfo de California y se le denominó "Proto Golfo". El área volcánica de Tres Vírgenes se encuentra ubicada dentro de una zona de gran debilidad, que está asociada a fallas de tipo transforme de orientación NW-SE que se inicia en el Golfo de California y se continúa en la península al noroeste de Santa Rosalía.

A finales del Mioceno Medio, los esfuerzos distensivos NE-SW a E-W, dieron como resultado la formación de las fallas de la región de rumbo NNW-SSE, que afectó a las rocas Pre-Pliocénicas.

Durante el Plioceno Inferior, esfuerzos compresionales N-S permitieron la formación de fallas con desplazamiento a rumbo.

El alineamiento de los principales centros de emisión en el área de Las Tres Vírgenes, permite inferir una fractura regional, de dirección predominante NNE-SSW, que al interceptarse con el sistema NW-SE originó zonas de mayor debilidad por donde ascendieron los magmas. Durante el Cuaternario, esfuerzos distensivos de rumbo WNW-ESE originaron la formación de nuevas fallas de rumbo NE-SW.

Es importante mencionar que en la actualidad existe una tectónica activa originada por el constante movimiento del desplazamiento de la Península de Baja California hacia el noroeste, a través del sistema de fallas transformes del Golfo de California, y que está afectando el campo geotérmico Tres Vírgenes.

3.2. Columna litoestratigráfica

El Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes se encuentra asociada a un conjunto de tres centros eruptivos plio-cuaternarios de afinidad calco alcalina, que contrasta con los productos toleíticos y alcalinos, típicos de esta región, donde domina la tectónica transtensional relacionada con la apertura del Golfo de California, relacionan esta anomalía a efectos residuales de la subducción en un margen de placa convergente antigua.

Complejo Tres Vírgenes (Qad), está constituido por dos aparatos volcánicos principales, El Azufre y la Virgen, así como varios aparatos satelitales entre ellos (El Viejo, El Partido), alineados con una dirección NNE-SSW. Descansan sobre un sub-basamento compuesto por las andesitas de la formación Santa Lucía y sedimentos Pliocénicos de la cuenca Santa Rosalía.

El vulcanismo cuaternario se inició en la caldera de la Reforma hace de 1.6 a 1.5 millones de años, con depósitos ignimbríticos y plinianos. El vulcanismo del complejo El Aguajito empezó hace unos 700 mil años, con la erupción de ignimbrita (Qia) concluyendo hace unos 500 mil años con derrames dacíticos y riolíticos.

Contemporáneamente con los eventos del Aguajito empezó el vulcanismo en el complejo de la Tres Vírgenes, con la emisión de andesitas y dacitas del volcán El Azufre (Qad) concluyendo en el Holoceno con la extrusión de domos y derrames dacíticos como el domo el Potrero (Qtd) y el derrame basáltico del volcán La Virgen en 1746.

La columna litoestratigráfica del campo geotérmico está constituida en su base por una Granodiorita de Biotita (81 ± 4 m.a cretácico superior) que pertenece al Cinturón Batolítico Cretácico, sobreyaciéndole un potente paquete de rocas volcánicas (26 a 19 m.a. Mioceno medio) llamado Formación Comondú,

Sobreyaciendo a la Formación Comondú se encuentran los derrames andesíticos de la Formación Santa Lucia (13 a 5) m.a Mioceno superior). En discordancia angular con esas rocas volcánicas miocénicas, se encuentran sedimentos marinos pliocénicos que son cubiertos a la vez por productos volcánicos cuaternarios provenientes del grupo volcánico El Aguajito y Tres Vírgenes.

3.3. Geología Estructural

Regionalmente se tienen identificadas dos etapas de deformación, ambas relacionadas con la apertura del Golfo de California, la más antigua se originó a fines del Mioceno (10 m.a) debido a esfuerzos distensivos con dirección NE-SW que produjeron fallas en su mayoría normales con dirección NW-SE, que se relacionan con el inicio de la evolución de la Cuenca de Santa Rosalía.

Las estructuras del sistema de fallas NW-SE forman un sistema de escalonamiento descendente hacia el este, dentro del campo geotérmico la que sirve como límite hacia el oeste a dicha cuenca es la falla El Partido.

A fines del plioceno se produjo la segunda etapa de deformación debido a un cambio en la dirección de los esfuerzos, de una extensión con dirección NE-SW se paso a otra de dirección WE. Este episodio produjo fallas N-S y la reactivación de las fallas más antiguas.

Los sistemas de fallas NW-SW y N-S ocasionaron zonas de debilidad y en el cuaternario formaron el sistema tectónico NE-SW.

En el campo geotérmico se tienen identificados cuatro sistemas estructurales, dos de ellos son los que tienen mayor importancia geotérmica, los cuales se describen a continuación:

3.3.1. El sistema de fallas NW-SE

Es uno de los más importantes y está representado por las fallas El Azufre, El Volcán, El Viejo (1 y 2) y El Partido, con las características siguientes:

La falla El Azufre, tiene un rumbo promedio de N 41° W + 68° buzando al NE y su espesor de falla es de 150m, lo cual difiere con estudios anteriores que dicen buza hacia el SW.

Falla El Volcán, tiene un rumbo que varía de NW 56°-59° SE + 61°-85° al NE, su espesor de fracturamiento es de 152 m, esta activa en la actualidad, es conductora de fluidos y temperatura, presenta permeabilidad y al ser atravesada por los pozos es a través de ella donde se tiene la mejor producción de vapor.

Falla El Viejo (1), El Viejo (2), tienen un rumbo predominante que varía de de NW 41° - 56° SE + 61° - 85° al NE, con un espesor zona de falla fracturado de 78 y 82m respectivamente, son fallas que están activas en la actualidad. La falla El Viejo (2) es conductora de fluidos y temperatura, presenta permeabilidad y al ser atravesada por los pozos es a través de ella donde se tiene la producción de vapor.

Falla El Partido, tiene un rumbo promedio de N 43° W + 67° NE, su espesor de fracturamiento es de 90m.

3.3.2. El sistema de fallas N-S

Está formado por las fallas El Colapso, Cimarrón y Las Víboras.

La falla El Colapso tiene un rumbo en su porción sur NNW 7° SSE + 73° al SW y en su porción norte el rumbo cambia a NNE 7° SSW + 72° al NW y además presenta actividad hidrotermal y temperatura, su espesor de fracturamiento varía de 30 a 50m. En su porción norte presenta una manifestación hidrotermal (suelos calientes) con temperatura de 37°C y los minerales hidrotermales que se identificaron son; calcita, sílice, clorita, arcillas y óxidos.

Falla Cimarrón, tienen un rumbo NNW 04° SSE + 84° SW con inflexión a NNE 03° SSW + 73° NW, observándose evidencias de falla como estrías y un desplazamiento lateral derecho de 1.4 cm, con lo cual se determina que la falla Cimarrón esta buzando al W.

Falla Las Víboras, tiene un rumbo promedio NNE 06° SSW + 71° al SE, su espesor varía de 68 - 230 m, es conductor de fluidos, temperatura, tiene permeabilidad y esta activa hidrotermalmente en la actualidad. Dicho sistema de fallas tiene en su porción sur un rumbo NNW 04° SSE con inflexión en su porción Norte a NNE 05° SSW.

3.3.3. El sistema de fallas NE-SW

La falla La Puerta, no presenta actividad hidrotermal ni temperatura en superficie, tiene un rumbo que varía de SW 29° - 42° NE + 64°-73° al SE, su espesor de influencia fracturado es de 200m y es permeable en el subsuelo según la perforación del pozo LV-2.

4. Microsismicidad

El monitoreo de la actividad microsísmica pasiva en Tres Vírgenes tiene como propósito identificar zonas permeables en el subsuelo asociadas a fallas geológicas o de fracturamiento, que puedan estar relacionadas con el yacimiento geotérmico ya sea en la extracción del vapor o en la inyección de agua geotérmica, las cuales pueden manifestarse propiamente con la actividad de eventos sísmicos muy pequeños, denominados microsismos, debido a los movimientos de los fluidos geotérmicos o la reactivación de sistemas de fallas preexistentes. Se define como microsismicidad, aquella con magnitudes menores a 3.

4.1. Monitoreo sísmico en el campo geotérmico

Hasta 2008 en el campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S., la instrumentación sismológica estaba conformada con cinco acelerógrafos marca Kinematics autónomas, sin embargo por su antigüedad (mas de 10 años) estos equipos comenzaron a presentar problemas electrónicos en sus diferentes tarjetas. Por lo que el año del 2008 se decidió utilizar para el monitoreo temporal, otros sismógrafos nuevos de mayor rango dinámico, así como de mayor capacidad de almacenamiento de información (un mes), capaces de guardar en forma continua registros de sus tres componentes de movimiento (NS, EW y Z) a 100 muestras por segundo. Para este monitoreo, que se inició en el mes de abril, se instalaron ocho equipos con estas características. La distribución espacial de la nueva red sísmica temporal se muestra en la Figura 2, donde se muestra la distribución actual de las estaciones sísmicas autónomas, así como la estación central y estación repetidora que se encuentra en la cima del volcán La Virgen. También se han graficado los pozos productores e inyectores y fallas geológicas.

En relación a la distribución de las estaciones sísmicas, puede observarse en la Figura 2 que actualmente la cobertura de la red sísmica es buena para monitorear las áreas sísmogénicas de interés geotérmico; así como para contar con localizaciones de sismos aceptables con respecto a la cobertura actual.



Figura 2.- Mapa que muestra la cobertura de la red sísmica actual.

4.2. Procesamiento de la información

Para el procesamiento y localización de los sismos se ha seguido el siguiente procedimiento:

Se realizó la recopilación de toda la información sísmica registrada en las estaciones de la red sísmica. Se procedió a seleccionar registros con señales sísmicas de eventos locales, regionales, lejanos y armónicos o raros registrados en 3 a más estaciones, tomando como base la estación TV01 debido a que esta estación presenta un menor ruido de fondo, por estar ubicado sobre un afloramiento rocoso.

El análisis de los tipos de eventos sísmicos, se realizó aprovechando las características de un sismógrafo de banda ancha, que registra archivos de una hora, los cuales pueden ser graficados en forma de un tambor de 24 horas. El formato usado es el del sistema SEISAN versión 9.1 (Ottemoller et al, 2012) como se muestra en la Figura 3.

Se localizan los eventos, y se grafican en un mapa para correlacionarlos de acuerdo a su ubicación espacial con los sistemas estructurales reportados por geología.

Como parte del post-procesamiento de los datos, se llevan a cabo correcciones a las lecturas de la base de datos, con el fin de mejorar, cuando es posible, las localizaciones originales.

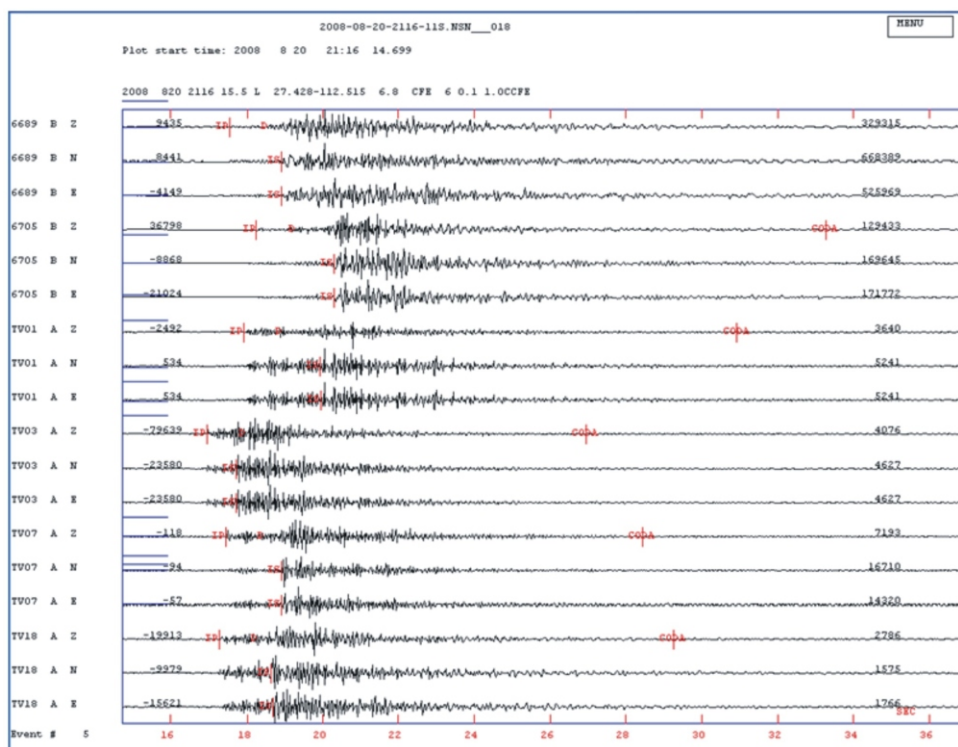


Figura 3.- Sismograma típico, se muestra un evento registrado en 6 estaciones, la escala inferior es el tiempo en segundos, nótese que la duración promedio es de aproximadamente 10 s.

4.3. Programa de Localización

El programa de localización utilizado en el presente estudio es el Hypocenter 3.2 (Lienert y Havskov, 1995) incluido dentro del sistema SEISAN versión 9.. Este programa al igual que otros utiliza como datos de entrada: nombre de la estación, coordenadas geográficas (latitud y longitud), elevación de la misma, la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P (T_p), S (T_s), la duración total del sismo, una relación de velocidad (V_p/V_s), un modelo de velocidad y una ecuación para el cálculo de la magnitud de duración.

Actualmente se cuenta con un catálogo de más de 550 eventos sísmicos, recopilados en diferentes periodos desde 2000 a 2011 por el M. C. Miguel Rodríguez González y el M. C. Javier Francisco Lermo Samaniego, cuyos análisis han permitido, relacionar la microsismicidad con un sistema hidrotermal de alta temperatura, tomando como base la geología del subsuelo proporcionada por los pozos.

La Figura 4 muestra la configuración de los epicentros más cercanos al complejo volcánico. Se observa una tendencia paralela a los aparatos volcánicos.

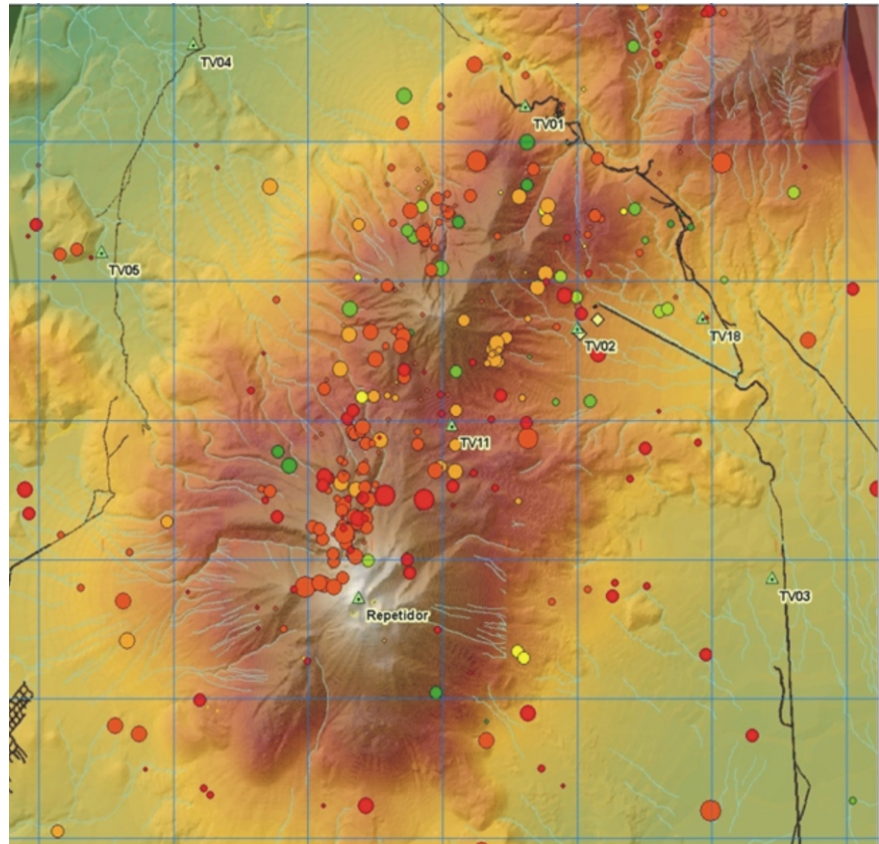
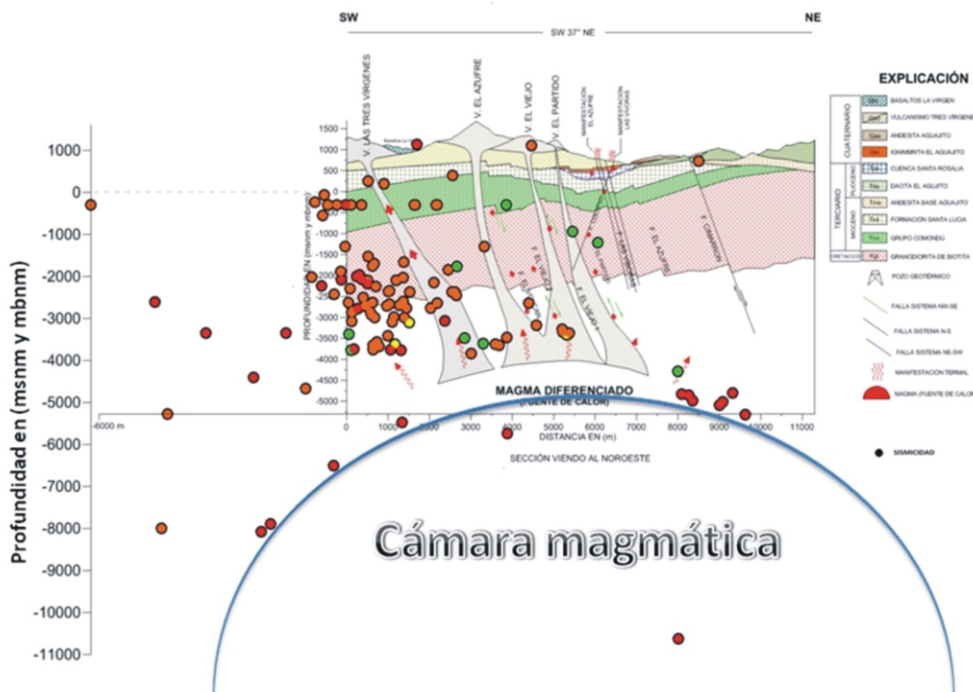


Figura 4.- Mapa de epicentros en las cercanías del complejo volcánico, los colores corresponden a la fecha de ocurrencia de los mismos, los verdes son los eventos de 2003, los amarillos 2007 y los rojos en 2011.

4.4. Cámara magmática

En 2010 se realizó un perfil que mostraba el Modelo Geotérmico Conceptual de Tres Vírgenes. Con la escasa información sísmica a la fecha, se sugirió la probable presencia de la cámara magmática de acuerdo al patrón de la sismicidad que fue registrada. Asociándola a una brecha sísmica por debajo de los 5500 mbnm.

Macías et al en 2011 sugieren la profundidad del sistema magmático a profundidades entre 7 y 9 km por debajo del cráter analizando la composición de los bordes de los minerales anfíbol y plagioclasa.



En 2012, se llevó a cabo la actualización del perfil descrito anteriormente, agregándole información actualizada y alargando un poco más de 6 km aproximadamente el mismo perfil hacia el SW, Figura 5.

Figura 5.- Sección que muestra en color el perfil original de 2010 como referencia espacial, los círculos de colores son los hipocentros

Al observar la distribución espacial de la sismicidad en las cercanías del complejo volcánico, parece evidente la existencia de una brecha sísmica por debajo de los 5500 mbnm. Además, la forma redondeada en la que se alinean los eventos a la profundidad mencionada podría sugerir que se trate de un lacolito. Esta cámara magmática del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes posiblemente estaría asociada a la fuente de calor del sistema geotérmico actualmente en explotación.

Usando la Figura 5 se puede estimar la probable longitud de la cámara magmática en la dirección del perfil de la figura mencionada. Esta cámara magmática tendría aproximadamente 13 km de longitud.

5. Conclusiones

- La cámara magmática del complejo volcánico, parece estar estacionaria, podría estar ubicada por debajo de los 5500 mbnm, asociada a una brecha en la actividad sísmica. Podría tener una extensión de aproximadamente 13 km en dirección N37°E, y pudiera tener la forma de lacolito. Asociando a su vez a esta probable cámara magmática como la fuente de calor de este sistema geotérmico.
- La sismicidad registrada a la actualidad parece estar relacionada con los sistemas estructurales activos de la zona y/o al sistema geotérmico actualmente en explotación.
- El aprovechamiento de la información sísmica registrada se usa prioritariamente para la realización de propuestas de pozos geotérmicos. Sin embargo, algunas técnicas de exploración han permitido conocer simultáneamente el entorno geológico.
- El monitoreo continuo de la sismicidad pasiva en el Campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes es importante para el aprovechamiento del recurso geotérmico, así como para la vigilancia del complejo volcánico.

6. Referencias

Gómez López, J. G., Pulido Arreola, S., Soto Peredo, J., Sandoval Medina, F. Modelo geotérmico actualizado del C. G. Las Tres Vírgenes, B. C. S. Informe DEX-DGL-DGF-DGQ-TV-05-10, de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, C. F. E., Junio 2010, pp 37.

Lermo, J., F. Romero, Y. Antayhua, I. Bernal, D. Vega y M. Chavacán. Estudio de la actividad sísmica del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S., Informe Técnico, Instituto de Ingeniería, UNAM, elaborado para la CFE- Gerencia de proyectos Geotermoeléctricos, Convenio: 9400012354, proyecto 3539, Junio del 2004, pp 46.

Lermo, J., Yanet Antayhua, German Espitia y Melitón Flores Cárdenas (2006), Monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Las Tres Virgenes, B.C.S., *Coord. Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería,*

Universidad Nacional Autónoma de México, realizado para: CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Dpto. de Exploración, proy 6515, pág. 57, México.

Lermo, J., Efrén Cruz, Eloy Mondragón, Carlos Valdes, Germán Espitia, (Diciembre-2008), Monitoreo Sísmico en el campo geotérmico de las Tres Vírgenes, Baja California Sur, *Instituto de Ingeniería,* Universidad Nacional Autónoma de México, realizado para CFE, Subdirección de Generación, proyecto 8530, México, pp

Lermo, J., Efrén Cruz, Pedro Hernández, Fernando Núñez, Edgar Urban y Germán Espitia, (Diciembre-2009), Estudio de sísmica pasiva en Tres Vírgenes, BCS, Periodo 2009, *Instituto de Ingeniería,* Universidad Nacional Autónoma de México, realizado para CFE, Subdirección de Generación, Convenio No 9400046742, proyecto 9520, México, 53 pp.

Lermo, J., Adriana Vargas, Edgar Urban, Héctor Rodríguez, Fernando Núñez y Germán Espitia, (Diciembre, 2010), Estudio de sismica pasiva en Las Tres Vírgenes, BCS., Periodo 2010, *Instituto de Ingeniería*, Universidad Nacional Autónoma de México, realizado para CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Departamento de Exploración, proyecto CFE-DEV-DGF-TV-25-10, México.

Lermo, J., Adriana Vargas, Edgar Urban, Héctor Rodríguez, Fernando Nuñez, Julio Romero, Germán Espitia y José Antonio Martínez, (Diciembre, 2011), Estudio de sismica pasiva en Las Tres Vírgenes, BCS., Periodo 2011, *Instituto de Ingeniería*, Universidad Nacional Autónoma de México, realizado para CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Departamento de Exploración, proyecto CFE-DEV-DGF-TV-18-11, México.

Lienert, B. R. E. and Havskov, J. (1995). A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seisology Research Letters*, 66:2636.

Macías Vázquez, J. L., Arce Saldaña, J. L., Garduño Monroy, V. H., Ramón Avellán, D., García Sánchez, L., Reyes Agustín, G., Rangel E., Saucedo Girón, R., Cisneros Máximo, G., Navarrete, J. A., Estudio de estratigrafía y geología del complejo volcánico Tres Vírgenes, B.C.S. Informe Final, Instituto de Geofísica, UNAM, elaborado para la CFE- Gerencia de proyectos Geotermoeléctricos, Convenio: 9400060892,.DEX-DGL-TV-17-11. Junio del 2011, pp 104.

Ottmoller, L., Voss P and Havskov, J. (2012). SEISAN. Earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and MacOSX. Versión 9.1. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Bergen, Norway. 372 pp.

Rodríguez, M. (2000). Procesado e interpretación de datos sísmicos registrados en la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, B.C.S. en el periodo Diciembre 1995-Julio 1996. Informe elaborado para la Gerencia de Proyectos Termoeléctricos. Enero de 1999.