

Monitoreo sísmico durante la estimulación ácida de los pozos LV-4 y LV-13 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, México

Saúl Venegas Salgado, Jesús Arredondo Fragoso, Germán Ramírez Silva, Magaly Flores Armenta y Miguel Ramírez Montes

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos
Alejandro Volta 655, Morelia, Mich., México, CP 58290. Correo: magaly.flores@cfe.gob.mx

Resumen

De septiembre a diciembre de 2004 se realizó un estudio de monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, simultáneamente con las estimulaciones ácidas de los pozos LV-4 y LV-13. Se utilizó una red sísmica conformada por cuatro sismógrafos digitales, logrando registrar en la estación sísmica TV20 un total de 174 sismos locales, 131 sismos regionales y muchas más señales de tipo volcánico, durante el periodo del monitoreo de la estimulación ácida. Además, se localizaron un total de 37 sismos, de los cuales 22 se ubican dentro de la zona geotérmica de mayor importancia a profundidades del orden de 0.4 a 4 km y magnitudes pequeñas típicas (0.7 a 2.2 Md), lográndose definir dos zonas de importancia asociadas, la primera, al sistema de fallas El Volcán (Zona A) y la segunda al pozo inyector LV-8 (Zona B). En la zona A, el efecto de la inducción y puesta en marcha de los dos pozos estimulados con una mayor producción de vapor el 30 de octubre y 17 de noviembre de 2004, aumentó la actividad sísmica hasta un máximo de 12 sismos por día a principios de diciembre. En la zona B, el efecto del inicio del enfriamiento de los dos pozos cambió el número de sismos que se originan en ella, ya que se observó un aumento de 6 sismos por día el 2 de octubre, disminuyendo días después. Por otro lado, también se observó un aumento de la actividad sísmica después de la inducción y puesta en producción nuevamente de los dos pozos productores, registrándose un máximo de 11 sismos por día a fines de noviembre. Finalmente, de acuerdo a la distribución sísmica, se puede concluir que los sistemas de fallas más activos son los de El Volcán y El Viejo. Las nuevas propuestas de perforación de pozos productores en este campo geotérmico están apoyadas en estos resultados.

Palabras clave: Estimulación ácida, sismicidad, microsismos, pozos, campo de Las Tres Vírgenes.

Seismic monitoring during acid stimulation of wells LV-4 and LV-13 at the Las Tres Vírgenes geothermal field, BCS, Mexico

Abstract

From September through December 2004 a seismic monitoring in the Las Tres Vírgenes, BCS, geothermal field was carried out simultaneously with the acid stimulation of wells LV-4 and LV-13. The seismic network had four digital seismographs and recorded 174 local seismic events, 131 regional ones and many more volcanic signals at seismic station TV20 during the acid stimulation. Additionally, 37 seismic events were located, 22 of them inside the most important geothermal zone at depths between 0.4 and 4 km with typically low magnitudes (0.7 to 2.2 Md). Two relevant zones were determined: Zone A related to the El Volcán fault system and Zone B related to injection well LV-8. In Zone A the well-induction stage and the operation start of the wells LV-4 and LV-13 after acidification on October 30 and November 17, 2004, increased seismic activity to a maximum of 12 daily events in early December. When the two wells in Zone B were cooled before the acidification, the seismic events recorded there increased to a maximum of 6 daily

events on October 2, and then decreased. Also in Zone B the seismic activity increased after well-induction and the start of well production once they were acidified, recording up to 11 daily events in late November. According to the seismic distribution, we may conclude that the most active fault systems are El Volcán and El Viejo. New proposals for well locations in the field are supported by these results.

Keywords: Acid stimulation, seismicity, microseism, wells, Las Tres Vírgenes field.

1. Introducción

La Región del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes y por tanto del campo geotérmico, se encuentra ubicado en el extremo oriental de la península de Baja California Sur, entre las coordenadas 27.40° N a 27.59° N y -112.40° W a -112.67° W (Fig. 1).

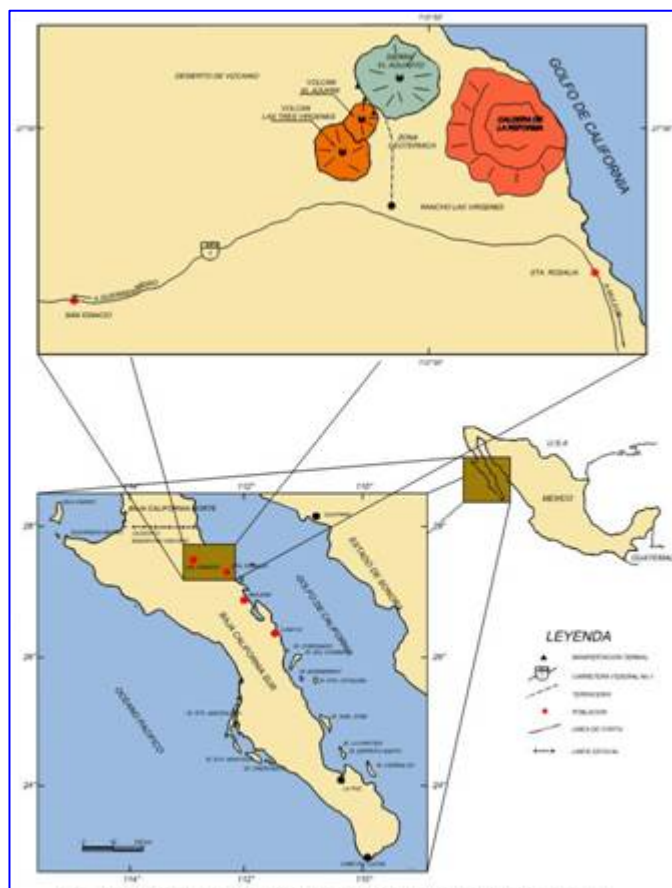


Fig. 1. Localización de Las Tres Vírgenes

Esta región presenta una geología y tectónica muy particular debido principalmente a la presencia del complejo volcánico compuesto de tres volcanes. El desarrollo de este complejo permitió la presencia de campos geotérmicos económicamente rentables como lo es actualmente el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes.

El estudio de la sismicidad en la región de Las Tres Vírgenes y sus alrededores empezó desde 1992 y ha continuado con interrupciones hasta 1999. Tanto los primeros trabajos (Guerrero-Guadarrama, 1997), como el último (Rodríguez, 2000) consideran a esta región como una zona de alta sismicidad. El trabajo reciente de Rodríguez (2000) logra registrar con la red permanente del campo geotérmico un total de 790 sismos en más de dos estaciones durante el periodo de enero-junio de 1999. De este total, Rodríguez asigna hipocentros a 70 sismos locales sobre el complejo volcánico de Las Tres Vírgenes. De estos selecciona los 14 eventos mejor localizados y los asocia a las trazas de las fallas de La Virgen y El Azufre.

En septiembre del 2003 el Instituto de Ingeniería de la UNAM y la CFE realizaron la instalación de 10 estaciones sísmicas (temporales y permanentes) alrededor de esta región.

Esta red sísmica registró 17 sismos, mismos que se distribuyen en los extremos y sobre las trazas de los sistemas de fallas presentes. En general, estos sismos presentan magnitudes M_d menores a 2.1 y profundidades del orden de los 5 km. La orientación de la fuente obtenida a partir de la polaridad de la onda P indica que estos sismos presentan mecanismos focales de tipo normal, inverso y transcurrente. En consecuencia, el análisis de la actividad sísmica en superficie, en profundidad y sus mecanismos focales han permitido realizar una interpretación y la posible configuración de la sismotectónica de la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes.

Por otro lado, se estableció la influencia de la variación de los gastos de producción e inyección de los pozos y la ocurrencia de los sismos. Los resultados mostraron que existe una gran probabilidad de que los gastos de inyección y producción de los pozos tengan influencia en la ocurrencia de los sismos locales, como ya se ha demostrado en el campo geotérmico de Los Humeros (Lermo *et al.*, 2001).

Por lo tanto, dada la relación de los pozos productores e inyectores con la sismicidad local se realizó un monitoreo para observar la distribución temporal y espacial de la actividad sísmica provocada por la estimulación ácida realizada a los pozos LV-13 y LV-4, entre septiembre y diciembre de 2004, y sobre todo para definir las fallas o sistema de fallas que se activan con esta estimulación ácida.

2. Estructuras y pozos en Las Tres Vírgenes

Además de los volcanes, la manifestación estructural predominante en el área es el conjunto de fallas con dirección NW-SE (Fig. 2). De éstas, la que está más hacia el NE es la Falla El Azufre, que en general corre a lo largo de la depresión topográfica entre el Volcán El Viejo al SW y el complejo Aguajito al NE. La falla más al SW es la Falla La Virgen, que pasa a través de la parte superior del Volcán La Virgen.

La anomalía térmica coincide en general con la intersección de este sistema de fallas de tendencia NW-SE con el Sistema Cimarrón de tendencia N-S (Teysier, 1990), que comprende la Falla Cimarrón además de otras varias fallas y/o fracturas con tendencia N-S (Fig. 2). Estas fallas han sido localizadas en detalle en mapas, sobre todo en las áreas de manifestaciones termales y en los pozos profundos del norte, aunque la mayor extensión de ambos sistemas de fallas está enterrada debajo de rocas volcánicas jóvenes. Según esto, muchas de las trazas de fallas son inferidas.

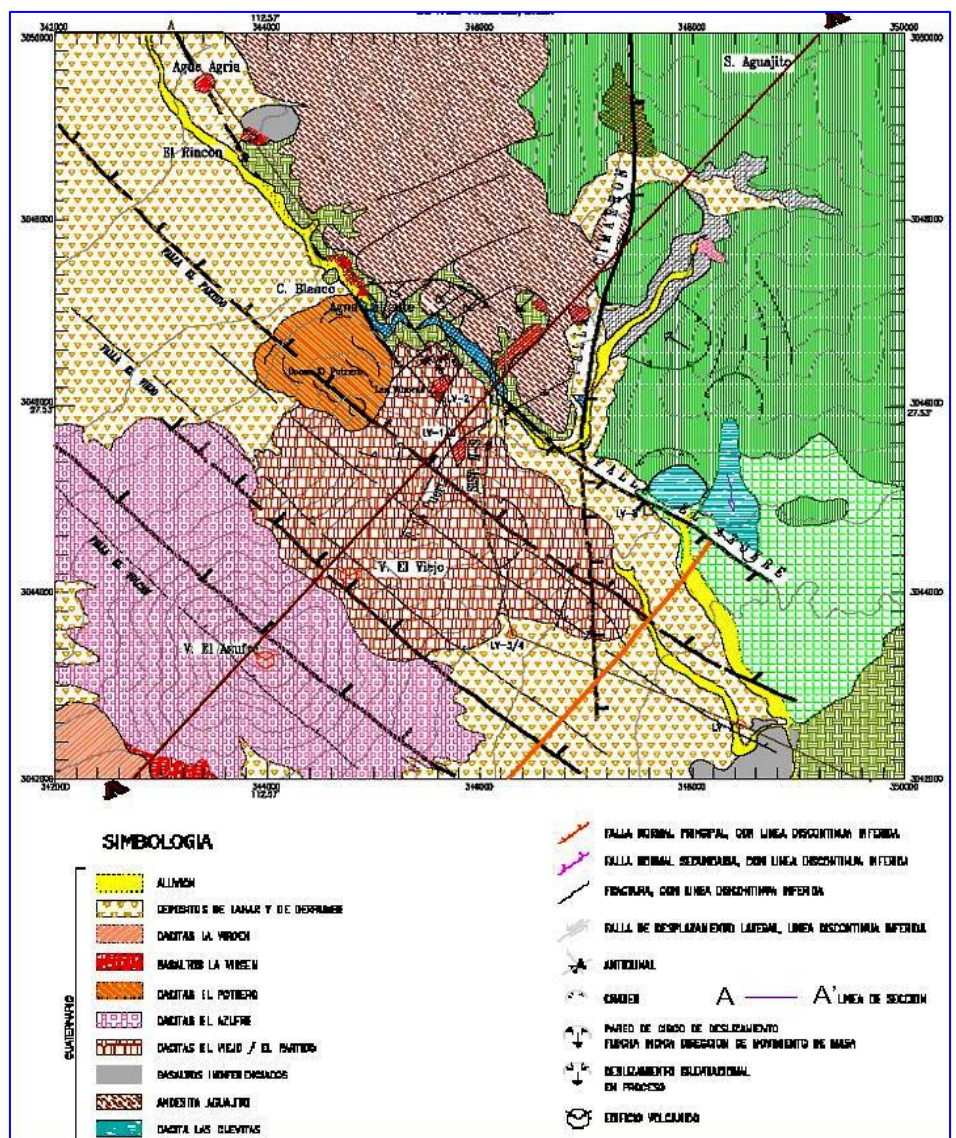


Fig. 2. Geología de Las Tres Vírgenes

El mayor desplazamiento en ambos sistemas de fallas tiene fecha anterior a la formación de Las Tres Vírgenes, y sólo pequeños movimientos han continuado durante tiempos más recientes. Algunos de estos desplazamientos cortan las Dacitas El Viejo, y quizás las rocas más jóvenes de los volcanes El Azufre y Las Tres Vírgenes. El sentido y magnitud del desplazamiento de las diferentes fallas es variable y no siempre bien conocido. Por ejemplo, la Figura 2 muestra que la mayoría de las fallas son normales, aunque en la Falla Las Víboras hay desplazamiento oblicuo y en varias fallas relativamente menores con tendencia N-S, en la vecindad de los pozos LV-1, LV-2 y LV-5, ocurren desplazamientos laterales.

Si bien los mapas de la geología superficial y los correspondientes cortes transversales no muestran estructuras importantes con tendencia NE-SW, interpretaciones de gravimetría han sugerido que la conexión tectónica entre la Falla El Azufre y la Falla La Virgen ha creado varias fallas con tendencia NE-SW que están enterradas debajo de la superficie volcánica. Probablemente estas fallas forman los linderos SE y NW del yacimiento geotérmico (ver Figura 2), y también puede ser que hayan creado parte de la permeabilidad por fracturamiento dentro del yacimiento (CFE, 1998b).

A continuación se describen las características de los pozos productores que se sometieron a acidificación y del pozo inyector LV-8.

Pozo LV-4

Este pozo se perforó direccionalmente al SW y fue diseñado para cruzar las fallas de tendencia NW-SE a profundidades superiores a 1,500 m. Hubo zonas de pérdida de circulación en la parte superior del basamento granítico y hasta 1,350 m, pero fueron aislados por la T.R. de 9 5/8" de diámetro. Otras pérdidas de circulación sucedieron entre 1,600 y 2,040 m y hubo una pérdida grande aislada aproximadamente a los 2,300 m. La falta de datos estables de temperatura por debajo de los 1,150 m impide determinar si este pozo pasa o no a través de la zona de inversión y llega a la zona con gradiente de incremento de temperatura como se observó en el pozo LV-3, que comparte la misma plataforma.

Durante 2003 el pozo LV-4 presentó una disminución en su producción de vapor a partir del mes de marzo, la cual fue aun menor en el mes de diciembre, por lo que fue necesaria su intervención.

Pozo LV-13

El pozo LV-13 fue perforado de octubre de 2000 a mayo de 2001 en la zona sur del campo, al este del volcán El Azufre. Es un pozo vertical, con una profundidad final de 2,414 m. Durante la perforación se presentó un problema de la sarta de perforación quedándose dentro del pozo tubería y herramienta de perforación con una longitud de 152 m (de 2,262 a 2,414 m). Tiene liner ranurado de 7" en el intervalo de 1,454 m a 2,262 m.

Se encontraron pérdidas de circulación cercanas a la parte superior de la granodiorita, entre 1,150 y 1,300 m, que fueron aisladas por la T.R. Más profundamente en la granodiorita, hubo pequeñas pérdidas a unos 1,800 m y se notaron pérdidas más grandes por debajo de los 2,050 m.

Este pozo fue estimulado con ácidos a finales de 2002, disminuyendo su producción por incrustación en los últimos meses de 2003, por lo que se sugirió también su intervención.

Pozo LV-8

El pozo LV-8 se perforó a 2 km al NW del LV-3/4 y a 2 km al SE del LV-1/5, para probar la extensión de la anomalía térmica e inyectar el agua extraída de los pozos de LV-3 y LV-4. Desviado al SW para cruzar la

intersección de la Falla Cimarrón con la Falla El Azufre a 1,700 m de profundidad, el pozo en su lugar encontró zonas permeables a varios intervalos entre 1,000 y 1,665 m.

3. Red sísmica y sismicidad

El campo geotérmico de Las Tres Vírgenes está instrumentado con cinco acelerógrafos autónomos marca Kinometrics para estudiar la actividad sísmica de la región y la relación que ésta guarda respecto al complejo volcánico y al patrón geológico-estructural, es decir para detectar cualquier sismo asociado a los sistemas de fallas (El Volcán, El Viejo, El Partido, El Azufre, etc.). Adicionalmente, como parte de este estudio se instalaron otros cuatro sismógrafos, los cuales se distribuyeron dentro de la zona del campo geotérmico, tratando de cubrir azimutalmente los pozos LV-4, LV-13 y LV-8. En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de la red permanente (triángulos azules) y la red temporal (triángulos oscuros).

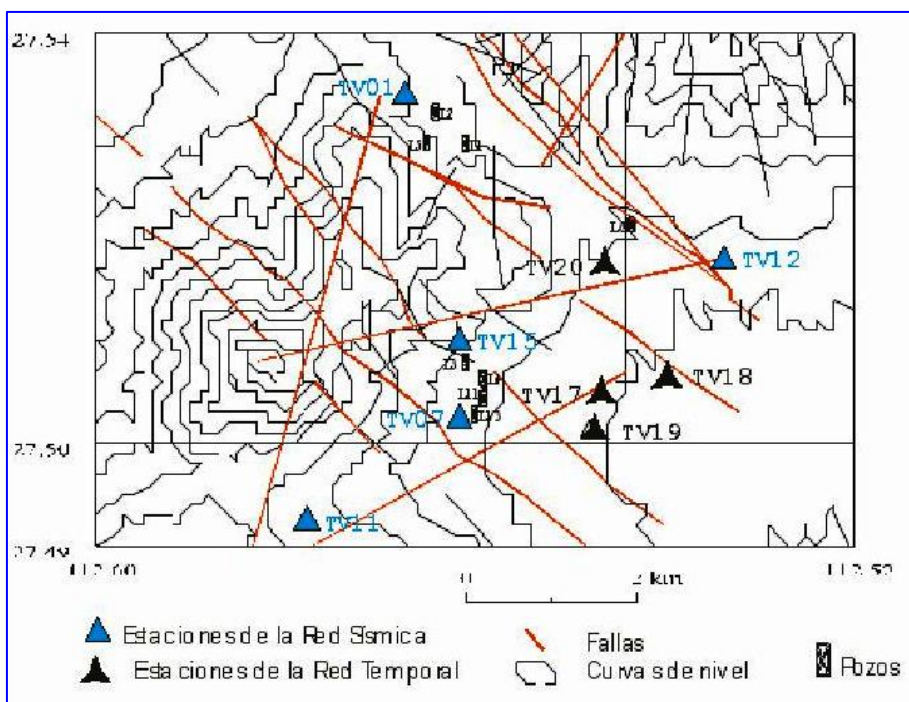


Fig. 3. Distribución de la red sísmica en Las Tres Vírgenes

Para identificar los diferentes tipos de eventos se utilizó la estación TV20 por tener un sensor de velocidad de mayor sensibilidad que los demás, y por tener un registro continuo a partir del 27 de septiembre (inicio de la estimulación ácida del pozo LV-13) al 23 de diciembre del 2004. Después de un análisis detallado en esta estación sísmica y en las demás estaciones, sólo se identificaron 20 sismos localizables. Si se agregan a estos 20 eventos los 17 sismos analizados por Lermo *et al.* (2003), se obtiene un total de 37 sismos locales dentro del campo geotérmico.

Con objeto de uniformizar la localización hipocentral de los 20 sismos identificados en este estudio

con los 17 analizados por Lermo y otros, se re-localizaron en conjunto los 37 sismos seleccionados.

En la Tabla 1 se presenta la localización hipocentral de esos 37 sismos locales. Los resultados muestran que la profundidad focal se encuentra entre 0.4 y 4 km. La magnitud varía entre 0.7 y 2.2 Md; es decir los eventos tienen una magnitud relativamente pequeña pero típica de sismos locales.

4. Zonas sísmicas

En la Figura 4, se presenta una distribución epicentral, simbolizados con un círculo oscuro seguido de un número, que corresponde a la Tabla 1. En esta misma figura, se han sombreado con color rojo, azul y amarillo, tres zonas sísmicas, las cuales se describen a continuación.

Nº	Fecha Año/Mes/Día	Hora Origen hh/mm/ss	Latitud Norte	Longitud Oeste	Prof. (km)	Magnitud (Md)
1	2003/09/20	05:25:10.2	27.523°	-112.546°	1.9	1.1
2	2003/09/20	22:47:51.8	27.523°	-112.546°	2.3	1.3
3	2003/09/22	20:08:39.5	27.447°	-112.552°	2.3	0.8
4	2003/10/02	02:00:56.9	27.352°	-112.511°	3.4	1.8
5	2003/10/02	03:03:41.8	27.366°	-112.495°	3.4	1.7
6	2003/10/02	09:00:29.6	27.363°	-112.522°	3.2	1.8
7	2003/10/04	15:39:37.6	27.408°	-112.523°	2.2	1.2
8	2003/10/14	07:33:16.1	27.386°	-112.488°	3.4	2.2
9	2003/10/18	11:53:27.2	27.507°	-112.585°	2.3	1.2
10	2003/10/18	11:56:53.1	27.505°	-112.587°	2.2	0.7
11	2003/10/24	06:15:39.8	27.523°	-112.570°	1.6	1.4
12	2003/11/25	23:18:37.8	27.520°	-112.543°	0.7	1.3
13	2003/11/02	23:20:26.7	27.526°	-112.576°	2.2	1.4
14	2003/11/05	17:35:18.6	27.466°	-112.617°	1.1	1.9
15	2003/11/05	17:35:52.4	27.457°	-112.616°	1.0	1.6
16	2003/11/05	18:51:01.9	27.530°	-112.570°	1.5	1.9
17	2003/11/13	00:51:52.5	27.427°	-112.579°	1.0	1.6
18	2003/11/17	13:44:22.4	27.405°	-112.486°	1.5	2.0
19	2003/11/19	20:22:51.5	27.394°	-112.469°	3.6	1.9
20	2003/12/13	00:59:02.1	27.378°	-112.614°	1.3	1.8
21	2004/01/25	19:45:34.4	27.391°	-112.570°	3.6	1.5
22	2004/07/14	19:13:05.4	27.505°	-112.589°	0.4	1.3
23	2004/08/07	21:21:05.2	27.514°	-112.589°	1.2	1.6
24	2004/08/08	08:20:54.3	27.515°	-112.590°	1.1	1.4
25	2004/08/12	01:19:39.8	27.537°	-112.611°	2.8	1.4
26	2004/08/30	07:30:49.0	27.549°	-112.551°	2.9	1.7
27	2004/09/29	07:34:28.0	27.564°	-112.570°	3.9	1.5
28	2004/10/02	17:53:11.6	27.392°	-112.552°	2.1	1.6
29	2004/10/07	12:12:54.6	27.491°	-112.560°	1.4	1.6
30	2004/10/07	17:14:04.1	27.490°	-112.568°	1.9	1.2
31	2004/10/08	08:46:32.0	27.494°	-112.583°	1.1	1.5
32	2004/10/13	11:15:50.5	27.421°	-112.508°	2.8	1.4
33	2004/10/24	03:26:55.0	27.510°	-112.576°	0.7	1.7
34	2004/10/31	04:26:42.3	27.582°	-112.536°	4.0	1.5
35	2004/11/01	06:28:59.5	27.498°	-112.565°	0.2	0.8
36	2004/11/01	20:48:36.4	27.524°	-112.553°	1.9	1.6
37	2004/11/27	16:01:15.9	27.517°	-112.551°	0.2	1.0

Tabla 1. Parámetros de los hipocentros de los 37 sismos registrados

Zona A

Esta zona señalada en la Figura 4 se ha seleccionado porque existe una gran probabilidad que los 11 sismos locales que se encuentran en ella fueran originados en el sistema de Fallas El Volcán. También se observa que estos eventos se ocurrieron en esta zona antes (números: 9, 10, 22, 23, 24 y 25) y durante la estimulación ácida (números: 29, 30, 31, 33 y 35).

En la Figura 5 se muestra un detalle más preciso de la ubicación de estos 11 sismos, siendo posible identificar dos subzonas simbolizadas con un círculo rojo más intenso (A1) y otro con un círculo morado (A2), con el objeto de resaltar su relación con el periodo de la estimulación ácida.

Zona B

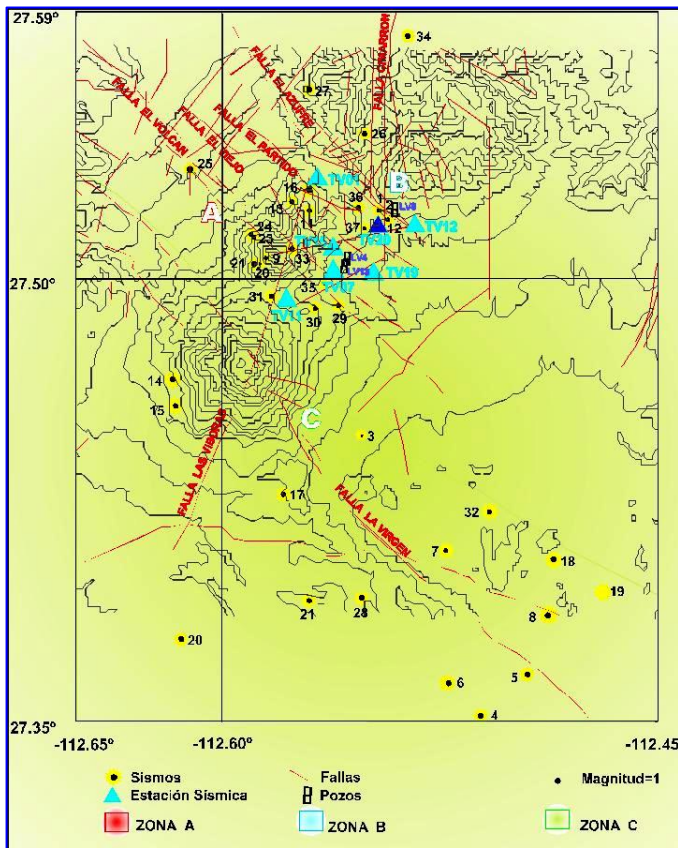


Fig. 4. Distribución de eventos sísmicos durante la estimulación ácida

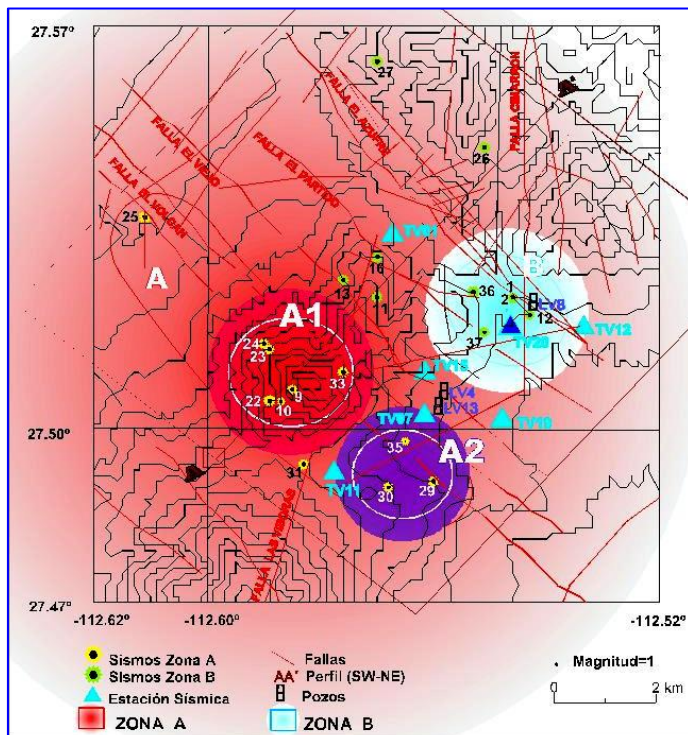


Fig. 5. Zonas de sismicidad asociadas a la estimulación ácida

Esta Zona B (Figuras 4 y 5) agrupa a los sismos localizados cerca del pozo inyector LV-8. Estos sismos que también han sido localizados antes (sismos con los números 1, 2 y 12, Tabla 1) y durante (números 36 y 37) la estimulación ácida, presentan en profundidad dos zonas bien delimitadas, denominadas como subzonas B1 y B2.

Zona C

Esta zona (Fig. 4) está conformada por 15 sismos locales que se ubican de manera muy dispersa en ambos extremos del sistema de fallas La Virgen. Es probable que estos sismos puedan estar relacionados con la actividad de esta falla y que la distancia epicentro-falla sea debido a la cobertura de la red.

Por otro lado, los sismos localizados fuera de estas tres zonas (A, B y C), pueden estar asociadas a otras fallas. Por ejemplo los eventos 11, 13 y 16 que fueron analizados por Lermo *et al.* (2003) tienen una relación directa con el sistema de fallas El Partido, mientras los eventos 26, 27 y 34 pueden estar asociados a las fallas de El Azufre y El Cimarrón, respectivamente.

Finalmente, de acuerdo a la distribución sísmica de este monitoreo que abarca 16 meses (septiembre de 2003 a diciembre de 2004) se puede concluir que los sistemas de fallas más activos son el de La Virgen y El Volcán, este último probablemente asociado a la producción de los pozos LV-3, LV4, LV11 y LV13.

Con objeto de evaluar la relación entre la sismicidad y la estimulación ácida se seleccionó la estación TV20, la cual es de mayor sensibilidad y mayor capacidad de almacenamiento de información, para permanecer registrando de manera continua el periodo de la estimulación ácida en los dos pozos programados. Esta estación se encuentra cerca del pozo inyector LV-8.

Una vez cuantificados los tipos de señales que se pudieron observar en la estación TV20 durante el periodo de la estimulación ácida (del 26 de septiembre al 13 de diciembre), se correlacionó con las actividades resaltantes durante la estimulación.

En la Figura 6 se muestra la gráfica del número de

sismos contabilizados en cada una de las dos zonas más cercanas a la estimulación ácida (Zona A y Zona B), donde además se incluyeron las dos actividades relevantes en el proceso de estimulación en los dos pozos.

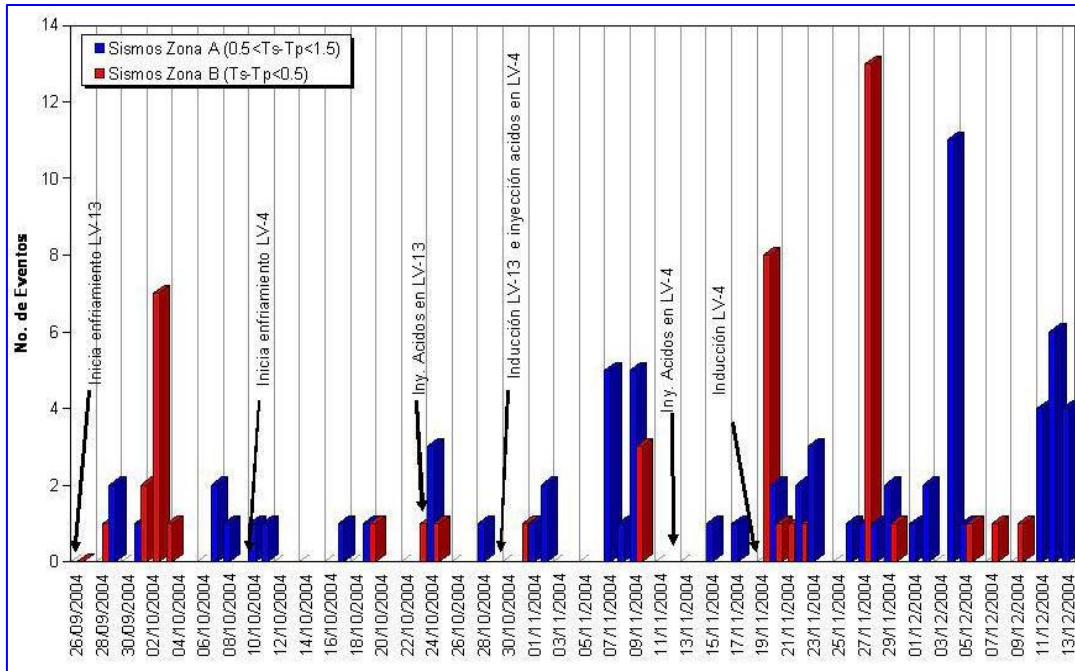


Fig. 6. Eventos sísmicos durante la estimulación ácida

De lo observado en esa Figura 6 se puede interpretar lo siguiente:

En la Zona A (sismos con grandes probabilidades de tener su origen en el sistema de fallas El Volcán) el efecto del inicio del enfriamiento de los dos pozos no cambió el número de sismos que se originan en esa zona (en esta zona ya había sismicidad antes de este proceso).

Sin embargo, el efecto de la inducción y puesta en marcha nuevamente de los dos pozos con una mayor producción, sí aumentó la actividad en esta zona, teniendo un máximo de 12 sismos por día a principios de diciembre.

En la Zona B (sismos con grandes probabilidades de tener su origen en dos zonas del pozo inyector LV-8) el efecto del inicio del enfriamiento de los dos pozos sí cambió el número de sismos que se originan en esta zona, ya que se observa un aumento de 6 sismos por día el 2 de octubre, disminuyendo días después. También se puede ver otro incremento el 23 de octubre, días después del inicio del enfriamiento del pozo LV-4. Por otro lado, también se observa un aumento de la actividad sísmica después de la inducción y puesta en marcha nuevamente los dos pozos productores, teniendo un máximo de 11 sismos por día a fines de noviembre.

5. Conclusiones

Del estudio del monitoreo de la actividad sísmica en la región de Las Tres Vírgenes durante la estimulación ácida de los pozos LV-13 y LV-4 (septiembre a diciembre del 2004), se concluye lo siguiente:

- Se localizaron un total de 37 sismos de los cuales 22 se ubican dentro de la zona geotérmica de mayor importancia a profundidades del orden de 0.4 a 4 km y magnitudes pequeñas, típicas de sismos locales (0.7 a 2.2 Md), logrando definir dos zonas sísmicas de importancia. Una está asociada al sistema de fallas El

Volcán (Zona A) y la segunda al pozo inyector LV-8 (Zona B). También se reconocieron de manera preliminar dos subzonas en cada una de estas zonas relacionadas con la estimulación ácida.

- En la Zona A el efecto de la inducción y puesta en marcha de los dos pozos estimulados con una mayor producción de vapor el 30 de octubre y 17 de noviembre de 2004, respectivamente, aumentó la actividad sísmica hasta un máximo de 12 eventos por día a principios de diciembre.

- En la Zona B el efecto del inicio del enfriamiento de los dos pozos cambió el número de sismos que se originan en esta zona, ya que se observó un aumento de 6 sismos por día el 2 de octubre, disminuyendo días después. Por otro lado, también se observó un aumento de la actividad sísmica después de la inducción y puesta en producción nuevamente los dos pozos productores, registrándose un máximo de 11 sismos por día a fines de noviembre.

- Finalmente, de acuerdo a la distribución sísmica de este monitoreo de 16 meses (septiembre del 2003 a diciembre del 2004) se puede concluir que los sistemas de fallas más activos son los de El Volcán y El Viejo. Las nuevas propuestas de perforación de pozos productores en este campo geotérmico deberán estar apoyadas en estos resultados.

Referencias

Capra, L, J. Macías, J. Espíndola, y C. Siebe (1998). Mapa geológico del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, Mexico. Inst. Geof. UNAM. Rev. JVGR.

Chavacán, M., J. Lermo y L. Quintanar (2004). Determinación de una escala de magnitud para temblores corticales en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano.

Comisión Federal de Electricidad (1998a). Ingeniería de Yacimientos del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S., México. Estado Inicial. CFE, informe interno No. JP-LTV-011-98. Inédito.

Comisión Federal de Electricidad (1998b). Proyecto Geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S., Estado Actual. CFE, informe interno No. JP-LTV-012-98. Inédito.

Guerrero Guadarrama, J.L. (1997). Actividad sísmica registrada en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S., CFE, informe interno No. DEX-TV-023/97. Inédito.

López, A., G. García y F. Arellano (1995). Geological and geophysical studies at Las Tres Vírgenes, B.C.S., Mexico, geothermal zone. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 18, pp. 275-280.

Lermo, J., J. Hurtado, J. Soto y J. Flores (2000). Análisis de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., Informe Técnico Final. CFE, informe interno No. DEX-HU-008/2000. Inédito.

Lermo, J., F. Romero, Y. Antayhua, I. Bernal, D. Veja y M. Chavacán (2004). Análisis de la actividad sísmica en el campo de Las Tres Vírgenes, B.C.S. Convenio 9400012354. Proyecto Interno 3539. Instituto de Geofísica de la UNAM. Inédito.

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 Geotermoeléctricos de la CFE. Inédito.

Teyssier, C. (1990). Geothermal Project Las Tres Vírgenes, Baja California, a Structural Geology Report. Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, Minneapolis. Inédito.

Wong, V., C. Rebolgar y L. Murguía (2001). Attenuation of Coda Waves at Tres Vírgenes Volcanic Area, Baja California Sur, México. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 4, pp. 683-693