

Estudio sismológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos

Javier Lermo⁽¹⁾, Yanet Antayhua⁽¹⁾, Luis Quintanar⁽²⁾ y Cecilia Lorenzo⁽³⁾

⁽¹⁾Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F. ⁽²⁾Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F. ⁽³⁾Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich. Correo: jles@pumas.iingen.unam.mx

Resumen

Se analiza la distribución en superficie y en profundidad de los sismos ocurridos en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla (México), durante el periodo 1997-2004. Los datos corresponden a 95 sismos registrados por más de cinco estaciones permanentes y temporales instaladas por la Comisión Federal de Electricidad y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyas magnitudes de duración son menores o iguales a 3.6 Md y profundidades focales que no sobrepasan los 4.0 km. Asimismo, se realizaron mecanismos focales simples y de inversión de tensor de momento, y se comparó el número de sismos registrados por dos estaciones de la red permanente (números S05, S06) con la inyección de agua y la producción de vapor durante cierto tiempo. Los resultados en superficie y en profundidad muestran actividad sísmica en la zona norte del campo, alrededor de los pozos inyectoros I29 (pozo H-29) e I38 (pozo H-38), mientras que los mecanismos focales simples y de tensor de momento evidencian esfuerzos de origen heterogéneo, sugiriendo que parte de la actividad sísmica ocurrida en Los Humeros puede haber sido “inducida” principalmente por el proceso de inyección de agua al subsuelo del campo geotérmico.

Palabras clave: Los Humeros, sismicidad inducida, mecanismos focales, distribución de esfuerzos.

Seismologic study of Los Humeros geothermal field, Puebla, Mexico. Part I: Seismicity, source mechanisms and stress distribution

Abstract

The distribution of earthquakes at the surface and at depth in the Los Humeros geothermal field, Puebla (México), is analyzed from 1997-2004. Data for 95 earthquakes were registered at more than five permanent and temporary stations installed by the Comisión Federal de Electricidad and the Instituto de Ingeniería of the Universidad Nacional Autónoma de México. The duration magnitudes of the quakes are equal to or lower than 3.6 Md and the focal depths do not exceed 4.0 km. Simple focal mechanisms and moment tensor inversions were made, and the number of earthquakes registered by two stations of the permanent network (numbers S05, S06) was compared with water-injection and steam-production volumes over a certain period. The results at the surface and at depth show seismic activity occurring in the northern zone of the field around injection wells I29 (well H-29) and I38 (well H-38); whereas, the simple focal mechanisms and moment tensors demonstrate stresses of heterogeneous origin, suggesting that part of the seismic activity in Los Humeros is probably “induced”, mainly by injecting water.

Keywords: Los Humeros, induced seismicity, focal mechanisms, stress distribution.

1. Introducción

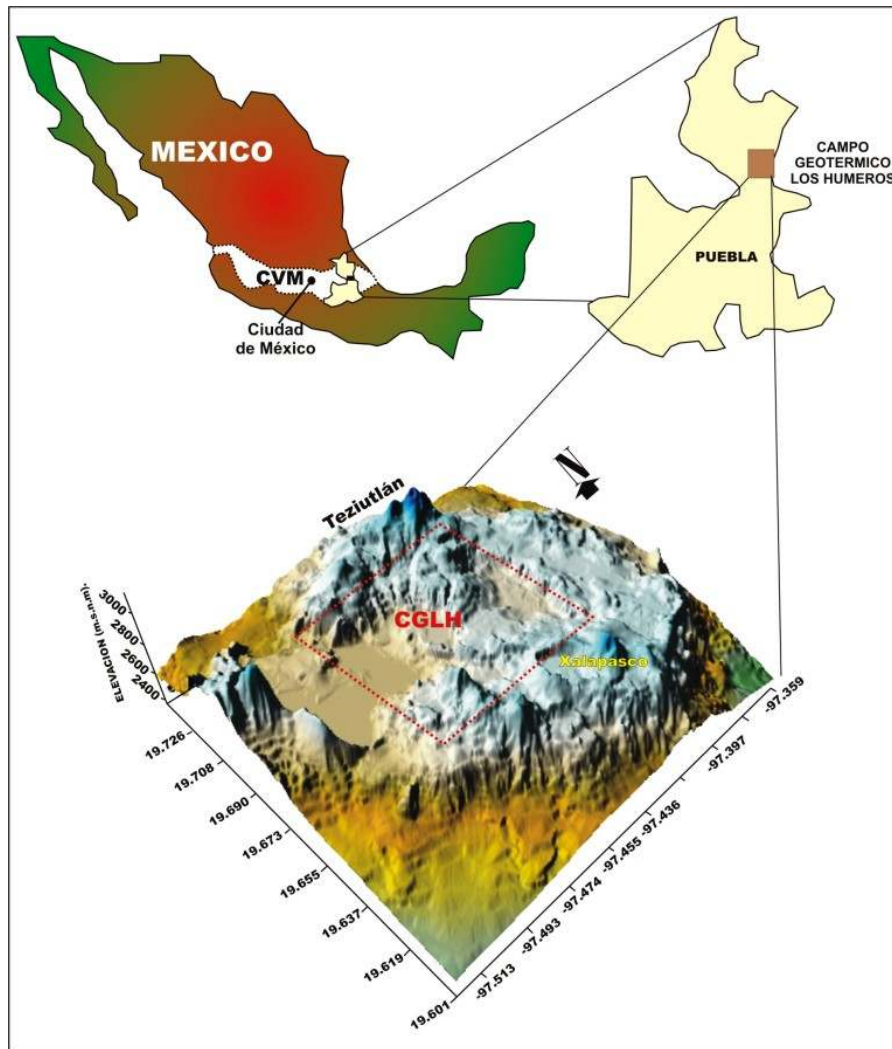


Fig. 1 Ubicación del campo geotérmico de Los Humeros (CGLH).

El Campo Geotérmico de Los Humeros (CGLH) se ubica en el extremo SE del Cinturón Volcánico Mexicano y a 200 km de la ciudad de México (Fig. 1). Los Humeros, al igual que otros campos geotérmicos existentes en México y el mundo, se desarrolló dentro de una caldera volcánica cuya constitución geológica y tectónica hicieron propicio su alto potencial geotérmico (Cedillo, 2000). Desde 1982 hasta la actualidad se han perforado unos 40 pozos entre exploratorios, productores e inyectores con un total de metros perforados de 87,352 (Gutiérrez-Negrín and Quijano-León, 2005), y una capacidad actual de 40 MW en 8 unidades de 5 MW cada una. En general, se ha observado que cuando un sistema natural es sometido a los procesos de inyección y explotación del subsuelo (agua, vapor de agua, gas y petróleo), el estado de esfuerzos puede ser alterado de manera considerable desencadenando a veces una intensa actividad sísmica (Gupta, 2002; Rutledge *et al.*, 2004; Ake *et al.*, 2005).

La importancia del monitoreo sísmico en el campo de Los Humeros se deriva básicamente del sismo del 25 noviembre de 1994 ($M_d=4.6$), el cual ocasionó daños considerables en su infraestructura (Lermo *et al.*, 1999). En diciembre de 1997 la CFE instaló una Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) compuesta por 6 sismógrafos digitales triaxiales (S01, S02, S03, S04, S05, S06) y algunas temporales (PNCF, PSCF, CLCF, HUCF, T07, T08, T09) alrededor del campo geotérmico. En el presente estudio se utilizó la información sísmica registrada durante el periodo 1997-2004 proveniente de estas dos redes sísmicas, a fin de analizar la distribución de la sismicidad, conocer los mecanismos de fuente que la generan, el estado de esfuerzos del campo geotérmico y la relación de los sismos registrados en las estaciones permanentes (S05, S06) con los pozos (inyectores, productores) y la tectónica local.

2. Geología y tectónica

La geología del campo geotérmico de Los Humeros ha sido descrita por diversos autores (Pérez-Reynoso, 1978; Yáñez-García *et al.*, 1979; Gutiérrez-Negrín, 1982; Viggiano y Robles, 1988; Cedillo, 2000). El basamento del CGLH está constituido por esquistos y rocas graníticas del Pérmico Tardío al Jurásico Temprano. Cubriendo a estas rocas de manera discordante, aparecen rocas sedimentarias del Triásico-Jurásico, cubiertas a su vez por una secuencia marina del Jurásico Superior al Cretácico Superior, con algunos afloramientos al oeste, este y sur de la caldera de Los Humeros. Sobreyaciendo al basamento descansa una secuencia de andesitas e ignimbritas del Terciario. La primera acumulación de rocas volcánicas ocurrió hace aproximadamente 11 millones de años (Ma) y está constituida por derrames de andesita de hornblenda, cubiertos parcialmente por derrames de andesitas de augita que procederían de los volcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba (5 Ma).

El vulcanismo más reciente está representado por coladas de lavas ácidas, básicas y rocas piroclásticas que se observan al centro de la caldera de Los Humeros (Figura 2a). El siguiente evento debió ser de tipo explosivo por la gran cantidad de material volcánico expulsado, ocasionando probablemente el vaciado parcial de la cámara magmática y el colapso del techo de la misma, originándose así la caldera de Los Humeros. Posteriormente, se sucedieron una serie de derrames de andesita basáltica y la emisión de grandes cantidades de pómez que cubrieron a la región (0.08 a 0.04 Ma). La fase final de la actividad volcánica del área está representada por derrames de composición basáltica que muestra una estrecha relación con el origen de la caldera del Xalapasco.

Tectónicamente, el CGLH presenta tres estructuras caldéricas, Los Humeros, Los Potreros y el Xalapasco, formadas en los diferentes eventos volcánicos ocurridos en el campo (Figura 2b). Estudios geofísicos de reflexión sísmica (COMESA, 1998), gravimetría (Campos-Enríquez y Arredondo-Fragoso, 1992) y transitorio electromagnético (TDM) (Seismocontrol, 2005) revelaron también la existencia de sistemas de fallas orientados principalmente en las direcciones NW-SE (Malpaís, Antigua, Los Humeros, Nueva, Imán), NE-SW (Pamela, Morelia, Parajes) y E-W (Las Papas). La falla Los Humeros es la única que puede ser observada en superficie y de acuerdo a los estudios de reflexión sísmica estaría conectada en profundidad con el yacimiento. A través de ella ascienden fluidos de alta temperatura hasta la superficie para dar lugar a las manifestaciones termales ubicadas. Asimismo, los análisis estructurales realizados en la falla Los Humeros muestran un movimiento de tipo normal con buzamiento hacia el este (Cedillo, 2000).

La perforación de los pozos en el CGLH permitió la identificación de 9 unidades estratigráficas del subsuelo, así como la definición de dos probables yacimientos geotérmicos, uno superior formado por andesitas e ignimbritas y otro inferior compuesto por andesitas y basaltos que están separados por una capa confinante de toba vítrea (Cedillo, 2000; Arellano *et al.*, 2000). La Figura 2c muestra el perfil estratigráfico representativo B-B' del CGLH, orientado en dirección este-oeste (E-W).

3. Estudios previos de sismicidad

Los estudios de sismicidad antes de la explotación del campo geotérmico de Los Humeros fueron mínimos (Ponce y Rodríguez, 1977); la mayor parte se ha realizado en la etapa de explotación (Lermo *et al.*, 1999; Lermo *et al.*, 2001, Lermo *et al.*, 2002; Lermo *et al.*, 2005). Los resultados de Ponce y Rodríguez (1977) muestran una mínima actividad sísmica local relacionada al campo.

Desde 1994 se cuenta con información sísmica continua, debido a la ocurrencia del sismo del 25 de noviembre de ese año a las 18:52 (hora GMT). Este sismo superficial (2.0 km), fue sentido en las ciudades de Teziutlán y Puebla con una intensidad de III en la escala de Mercalli Modificada (Fernández *et al.*, 1996). Sin embargo, en el campo geotérmico se percibió una intensidad de VIII en la misma escala, ocasionando algunos daños en la infraestructura de CFE (Lermo *et al.*, 1999). Con este antecedente, CFE instaló la red

sísmica de Los Humeros compuesta por seis estaciones permanentes distribuidas alrededor del campo geotérmico.

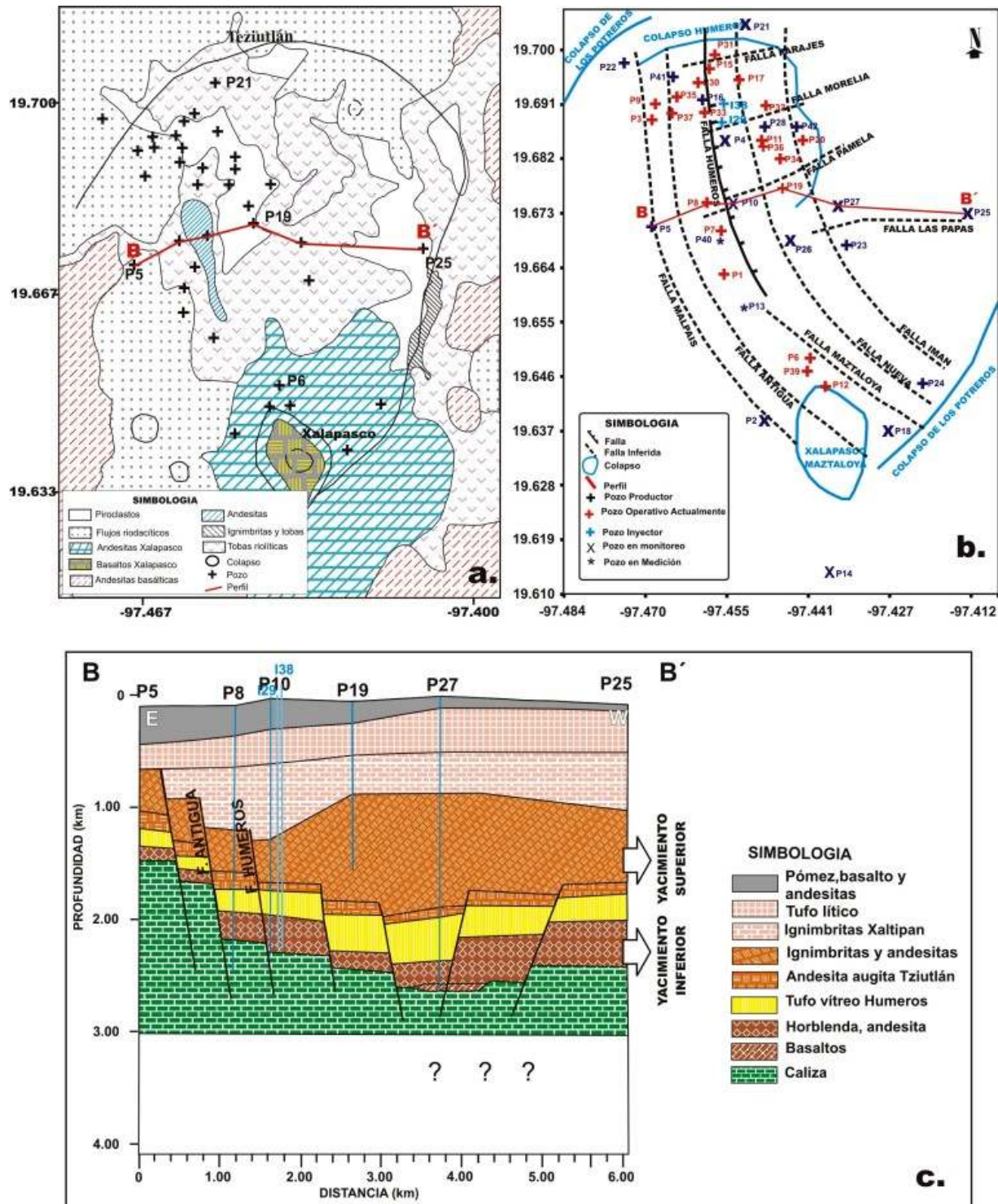


Fig. 2. Geología y tectónica del campo geotérmico de Los Humeros (modificado de Cedillo, 2000, y Arellano et al., 2000).

a) Principales productos volcánicos depositados en el campo y perfil B-B'. b) Principales elementos tectónicos y distribución de pozos inyector (I) y productores (P). c) Perfil estratigráfico orientado en dirección E-W según la Figura 2a.

Los estudios realizados con la información obtenida han permitido observar que desde diciembre 1997 hasta enero de 1999 la sismicidad se concentró principalmente en la zona norte (ZN) del campo geotérmico, es decir, alrededor de los pozos inyectoros I29 (H-29) e I38 (H-38) alcanzando profundidades del orden de 4.0 km. Pero a partir de febrero de 1999 también empezó a registrarse actividad sísmica en la zona sur (ZS) del campo. En general, los sismos se distribuyen a lo largo de la falla Los Humeros, en la cual, precisamente en su parte sur, ocurrió un sismo de magnitud moderada ($M_w = 3.6$) y profundidad superficial (2.0 km) el 21 de enero de 2002. El análisis de los parámetros de fuente de este sismo, realizado por Lermo *et al.* (2002), mostró concordancia con las características estructurales de la falla Los Humeros.

4. Datos y análisis de sismicidad

4.1. Redes sísmicas

La información sísmica utilizada en el presente estudio proviene de dos redes sísmicas instaladas alrededor del campo geotérmico de Los Humeros (Figura 3): una Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) y una Red Sísmica Temporal (RST). La primera red fue instalada el 1 de diciembre de 1997 y está compuesta por seis estaciones sísmicas (números S01, S02, S03, S04, S05, S06) las cuales contienen un registrador digital (Altus K2) acoplado a tres sensores de velocidad (Kinematics, Ranger SS-1) de periodo corto (1 s) en sus tres componentes: vertical (Z), norte-sur (N-S) y este-oeste (E-W). La ubicación original de las seis estaciones se conservó hasta febrero de 2002. Posteriormente, fue necesario reubicar cuatro estaciones (S01, S02, S03, S04) por problemas de robo, ruido y lejanía a la zona de mayor actividad sísmica (T07, T08, T09, T11).

La red temporal (RST) fue instalada durante los meses de julio a octubre de 1999 y todo el año 2000 alrededor de la estación permanente S05 y los pozos inyectoros I29 e I38. Esta red estuvo compuesta por cuatro estaciones de banda ancha (Reftek-Guralp), propiedad del Instituto de Ingeniería (I de I) de la UNAM (números HUCF, PNCF, CLCF, PSCF). Cada una de las estaciones estuvo conformada por un registrador Reftek 72A-08 de 24 bits y un sismómetro de 3 componentes (Z, N-S y E-W) marca Guralp CMG-40T de periodo natural de 30.8 s. Ambas redes tomaron registros con una frecuencia de muestreo de 100 muestras por segundo (100 m/s).

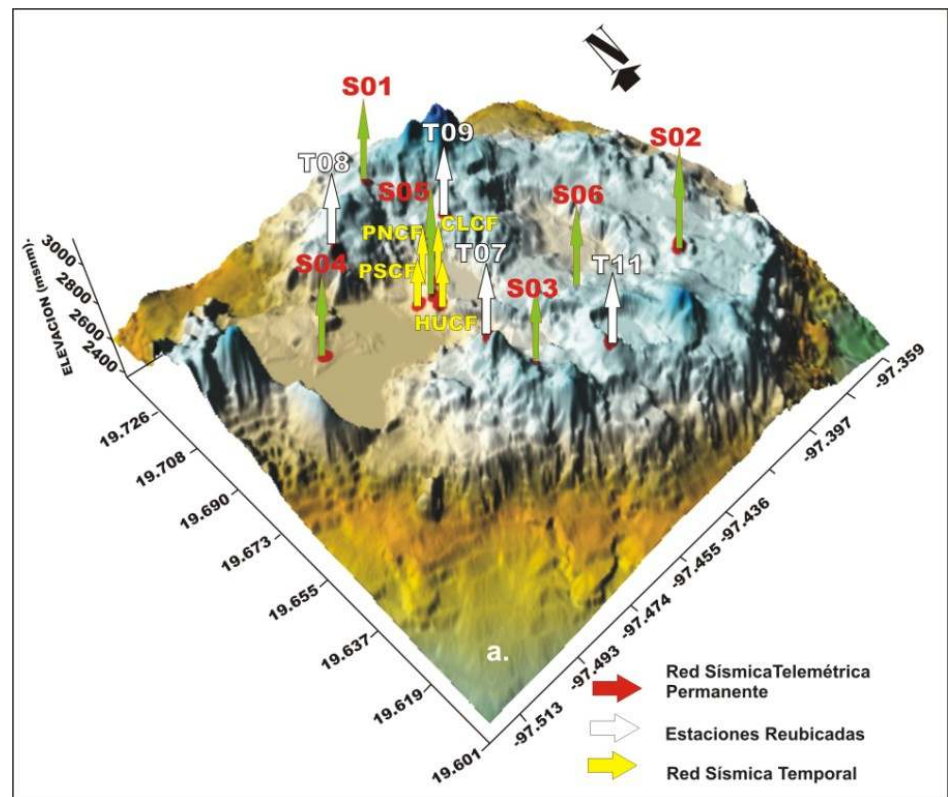


Fig. 3. Distribución de las estaciones sísmicas permanentes, reubicadas y temporales del campo geotérmico de Los Humeros.

En la Figura 3 se presenta la distribución de la RSTP (flechas verdes), las estaciones reubicadas (flechas blancas) y las estaciones de la RST (flechas amarillas).

4.2. Datos

La información sísmica utilizada en este estudio corresponde al periodo de diciembre de 1997 a diciembre de 2004 y proviene de las dos redes sísmicas mencionadas. Durante ese periodo las estaciones sísmicas registraron numerosos sismos locales, de los cuales se seleccionaron 95 sismos registrados en cinco o más estaciones y fases de ondas P y S fácilmente identificables, a fin de optimizar la localización hipocentral de los mismos (Antayhua, 2007).

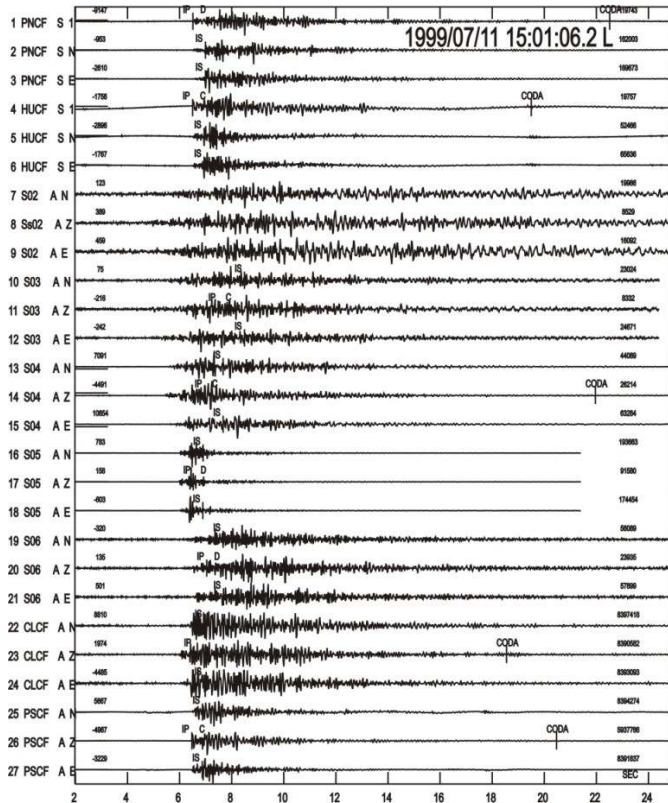


Fig. 4. Ejemplo de sismo registrado el 11 de julio de 1999 ($M_d = 2.2$) en las estaciones permanentes y temporales.

Un ejemplo de sismo registrado por las redes del campo geotérmico se presenta en la Figura 4 y corresponde a los registros del sismo del 11 de julio de 1999. El programa utilizado para su localización es el SEISAN versión 8.0 (Havskov and Ottemoller, 2003). Este programa, al igual que otros, utiliza como datos de entrada los siguientes: nombre de la estación, coordenadas geográficas (latitud y longitud), elevación, la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P (T_p) y 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. En este estudio la lectura de los tiempos de arribo se ha realizado con una precisión de 0.01 s para la onda P y de 0.05 s para la onda S. La relación $V_p/V_s = 1.76$ utilizada para la localización, se obtuvo construyendo la curva de Wadati a partir de los tiempos de arribo de las ondas P y S. Asimismo, el modelo de velocidad corresponde al propuesto por Lermo *et al.* (2000), para el cual se utilizó el perfil de reflexión sísmica realizado por COMESA (1998). La velocidad de la onda P (V_p) y la profundidad equivalente de 9 estratos de los que está compuesto el subsuelo de Los Humeros (Tabla 1) fue obtenida siguiendo la metodología descrita por Dix (1995). La

ecuación de magnitud de duración corresponde al propuesto por Chavacán *et al.* (2004), donde:

$$M_d = -1.61947 + 2.336177 \log_{10}(T) + 0.00052(D),$$

siendo M_d la magnitud de duración en grados corregida a partir de la ecuación propuesta por Lee *et al.* (1972), T la duración total del sismo en segundos y D la distancia epicentral en kilómetros.

Profundidad (km):	0.00	0.24	0.65	1.25	1.79	1.93	2.13	2.37	30.00
V_p (km/s):	1.24	1.94	2.85	3.54	3.69	3.90	4.14	5.18	6.00

Tabla 1. Modelo de velocidad obtenido por Lermo *et al.* (2001). V_p es la velocidad de la onda P.

Los resultados muestran incertidumbres de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) menores de 1 km (Figura 5b), profundidades focales que no sobrepasan los 4 km y magnitudes de 0.8 a 3.6 M_d . Estas características en profundidad y magnitud de los sismos ocurridos en Los Humeros fueron observadas también por Lermo *et al.* (2002, 2005).

4.3. Sismicidad

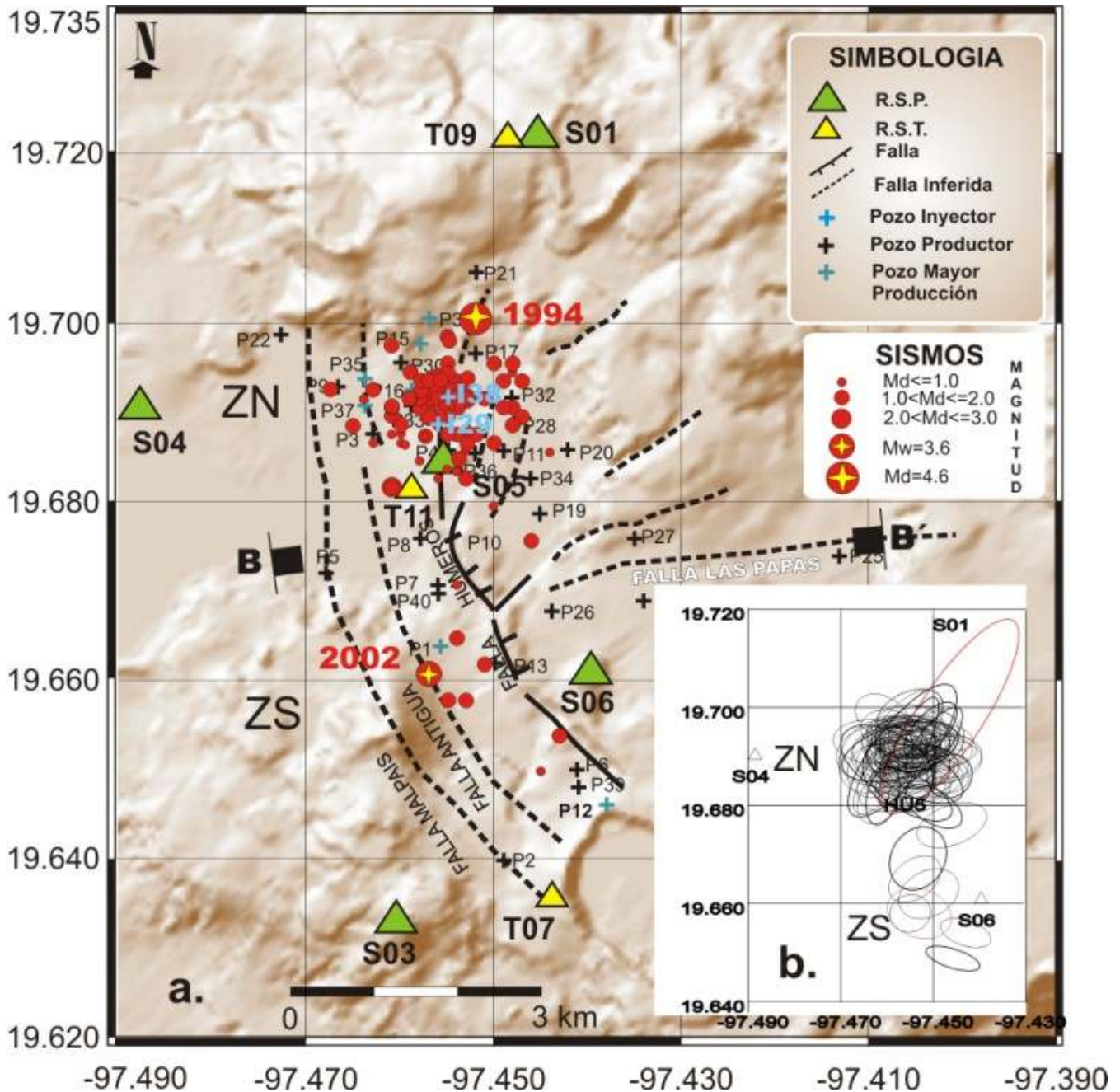


Fig. 5. a) Distribución epicentral de los 95 sismos seleccionados en el estudio. B-B' es el perfil sísmico orientado en dirección E-W. b) Elipses de error de la localización epicentral del total de sismos. Las elipses en color rojo representan epicentros con errores entre 1 y 2 km en su localización.

En la Figura 5a se presenta la distribución en superficie de los 95 sismos seleccionados, además de sus elipses de error (Figura 5b). Puede verse que los sismos se distribuyen principalmente en la ZN del campo geotérmico y muy pocos en la ZS. Asimismo, la mayor concentración parece observar en y alrededor de los pozos inyectoros I29 e I38, y al norte de la falla Los Humeros. Justamente al norte de esta falla se ubica el epicentro del ya mencionado sismo del 25 de noviembre de 1994 que causó algunos daños a la infraestructura del campo. Al sur de la falla Antigua se localiza el sismo del 21 de enero del 2002. Ambos sismos, el de 1994 y el de 2002, son hasta la fecha los de mayor magnitud (Md=4.6 y Mw=3.6) ocurridos en Los Humeros. Las elipses de error de la localización de los epicentros aparecen en la Figura 5b, correspondiendo las de color

negro a epicentros localizados con un error menor de 1 km y las color rojo a epicentros con error en su localización entre 1 y 2 km.

La distribución en profundidad de esos 95 sismos seleccionados se presenta en el perfil estratigráfico B-B', orientado en dirección E-W (Figura 6). En este perfil representativo del campo geotérmico de Los Humeros, se observa que la mayoría de los hipocentros se localiza entre los 2 y 4 km de profundidad y tienden a concentrarse entre la traza de las fallas Antigua y Los Humeros. Muchos de ellos tienen profundidades focales mayores que la profundidad total de los dos pozos inyectoros (I29, I38), y se ubican dentro del paquete de rocas sedimentarias (calizas). El yacimiento geotérmico está contenido en las rocas andesíticas que sobreyacen a las calizas, y usualmente estas han sido consideradas rocas con muy baja permeabilidad. Por lo tanto, la ubicación de los sismos en esas calizas sugiere un probable fracturamiento de esta capa por la presión ejercida por los procesos de inyección y producción, lo que podría llevar a incrementar su permeabilidad por lo menos en esa zona.

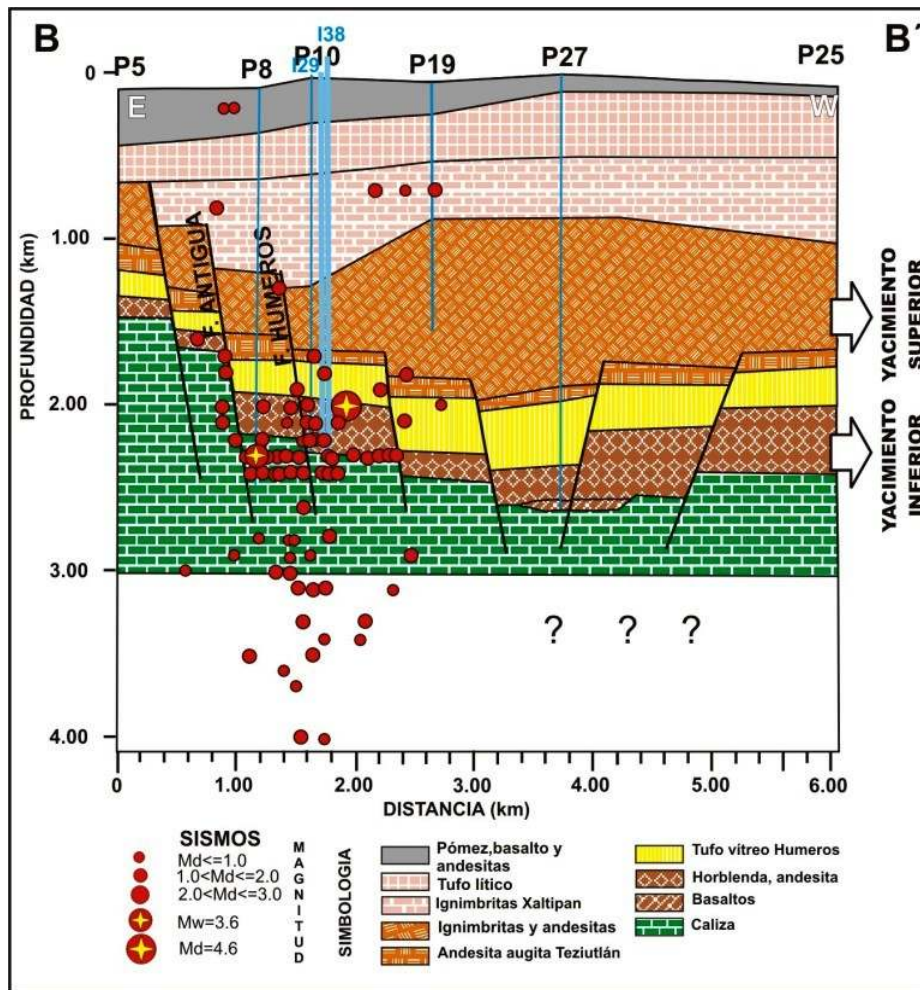


Fig. 6. Distribución de los sismos en profundidad sobrepuesta en el perfil estratigráfico (B-B') del campo de Los Humeros.

esfuerzos tienen fuentes diferentes.

De los 95 eventos seleccionados, 28 fueron registrados en cinco o más estaciones y la polaridad de la onda P fue de tipo impulsivo; para esos 28 eventos se obtuvo la solución de los mecanismos focales simples. Para ello se siguió la metodología descrita por Reasenberg and Oppenheimer (1985) y la opción “focmec” del programa de procesamiento SEISAN (Havskov and Ottemoler, 2003). En la Figura 8 se muestran mecanismos focales simples obtenidos para 8 sismos. Los mecanismos con polaridad C y D están

5. Mecanismos de Fuente

5.1. Mecanismo focal simple

Para obtener los mecanismos focales simples y de tensor de momento, se analizó primero la polaridad de la onda P registrada en la estación S05 (la más cercana al agrupamiento sísmico), debido a que durante el periodo de estudio (diciembre 1997 a diciembre 2004) los sismos se registraron de manera intercalada con polaridades compresionales (C) y dilatacionales (D). En la Figura 7 la dirección de las flechas en color amarillo representa las polaridades C y D. Debido a esa intercalación de polaridades, es probable que el esfuerzo generado en el campo se deba a fuentes diferentes, aunque podrían existir otras explicaciones. En este trabajo, los mecanismos focales simples y de tensor de momento se analizaron considerando que, en efecto, los

representados con barras en color café y azul, respectivamente. Se considera que el plano de falla de los mecanismos sigue la tendencia de las fallas del campo geotérmico de Los Humeros (NNW-SSE aproximadamente), pero las soluciones de los mecanismos no muestran concordancia con las fallas. Por el contrario, corresponden a diversos tipos de fallamientos: transurrencia lateral derecha, lateral izquierda, normales e inversos con pequeñas componentes de transurrencia. Esta heterogeneidad en el tipo de falla podría estar asociada con los procesos de inyección de agua y de producción de vapor.

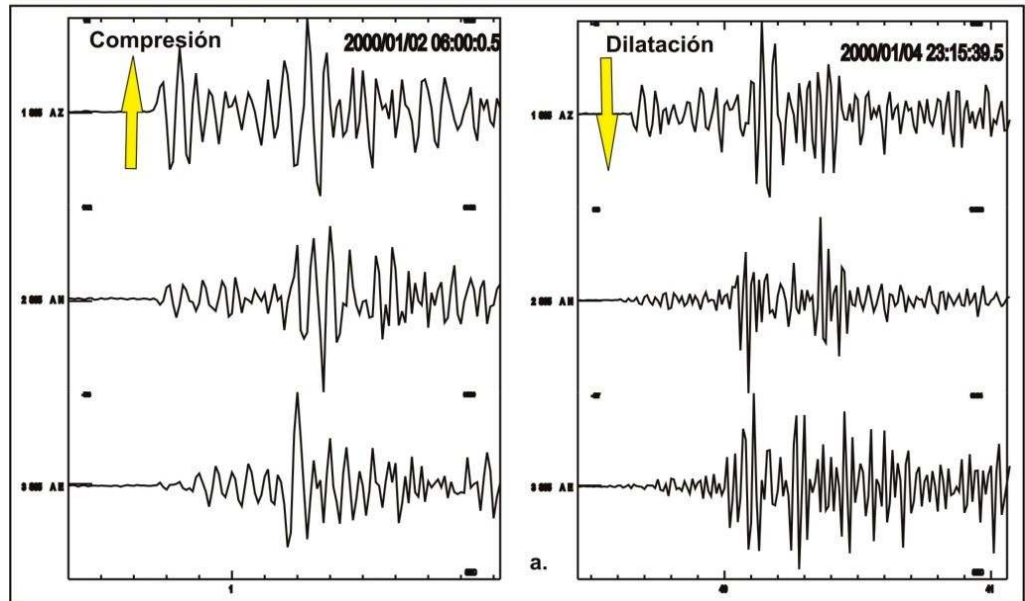


Fig. 7. Ejemplos de sismos registrados en la estación S05 con polaridad compresional (lado izquierdo) y dilatacional (lado derecho) durante enero del año 2000.

5.2. Mecanismo de tensor de momento

Básicamente, los mecanismos focales simples obtenidos para 28 de los 95 eventos seleccionados han permitido conocer los parámetros de los planos de falla (azimut, buzamiento y ángulo de desplazamiento). Pero existe otro método para conocer esos mismos parámetros, que es la inversión del tensor de momento. Este método, a diferencia del anterior, invierte las formas de onda utilizando las funciones de Green, que son generadas a partir del modelo de velocidades de la zona de estudio, el cual explica la propagación de las bajas frecuencias.

El programa utilizado para la inversión es el de Dreger (2002), en el que la representación general de la fuente sísmica se asume como una fuente puntual en el espacio y tiempo según la relación:

$$U_n(x, t) = M_{ij} G_{nij}(x, z, t),$$

en la que: U_n es la componente de desplazamiento observado, G_{nij} es la componente de las funciones de Green para especificar las orientaciones del par de fuerzas, M_{ij} es el tensor de momento sísmico escalar que describe la magnitud del par de fuerzas, ij son las direcciones geográficas. En esta distribución únicamente el tensor de momento desviatorio es resuelto utilizando mínimos cuadrados. Así, M_{ij} es descompuesto en M_0 , tensor de momento de doble par de fuerzas, y un vector lineal de compensación del tensor de momento (Jost y Herrmann, 1989). Para realizar la inversión el programa requiere de los parámetros hipocentrales, coordenadas geográficas de las estaciones, modelo de velocidad en espesores, además de un filtro adecuado para obtener las bajas frecuencias del sismo. La calidad de la solución de la inversión se muestra de manera gráfica y numérica. El porcentaje de la reducción de la varianza (Var. Red.), de 0 a 100%, define la calidad de la solución, siendo el valor más alto un indicador de la buena calidad del mecanismo de tensor de momento.

En total se invirtieron 34 sismos registrados en 1, 2 y 3 estaciones. Los resultados obtenidos de la inversión fueron los parámetros de la falla (azimut, inclinación, desplazamiento), momento sísmico escalar (M_0), magnitud de momento (M_w), ejes de presión (P) y tensión (T) y calidad de la solución (Var. Red.). Estos resultados para los 34 sismos procesados por este método de inversión del tensor de momento se presentan en la Tabla 2 y en la ya mencionada Figura 8. En esta figura aparecen solamente los 18 sismos procesados que se registraron en más de una estación (ver Tabla 2), 8 de los cuales se comparan con los mecanismos focales simples obtenidos con la polaridad de la onda P.

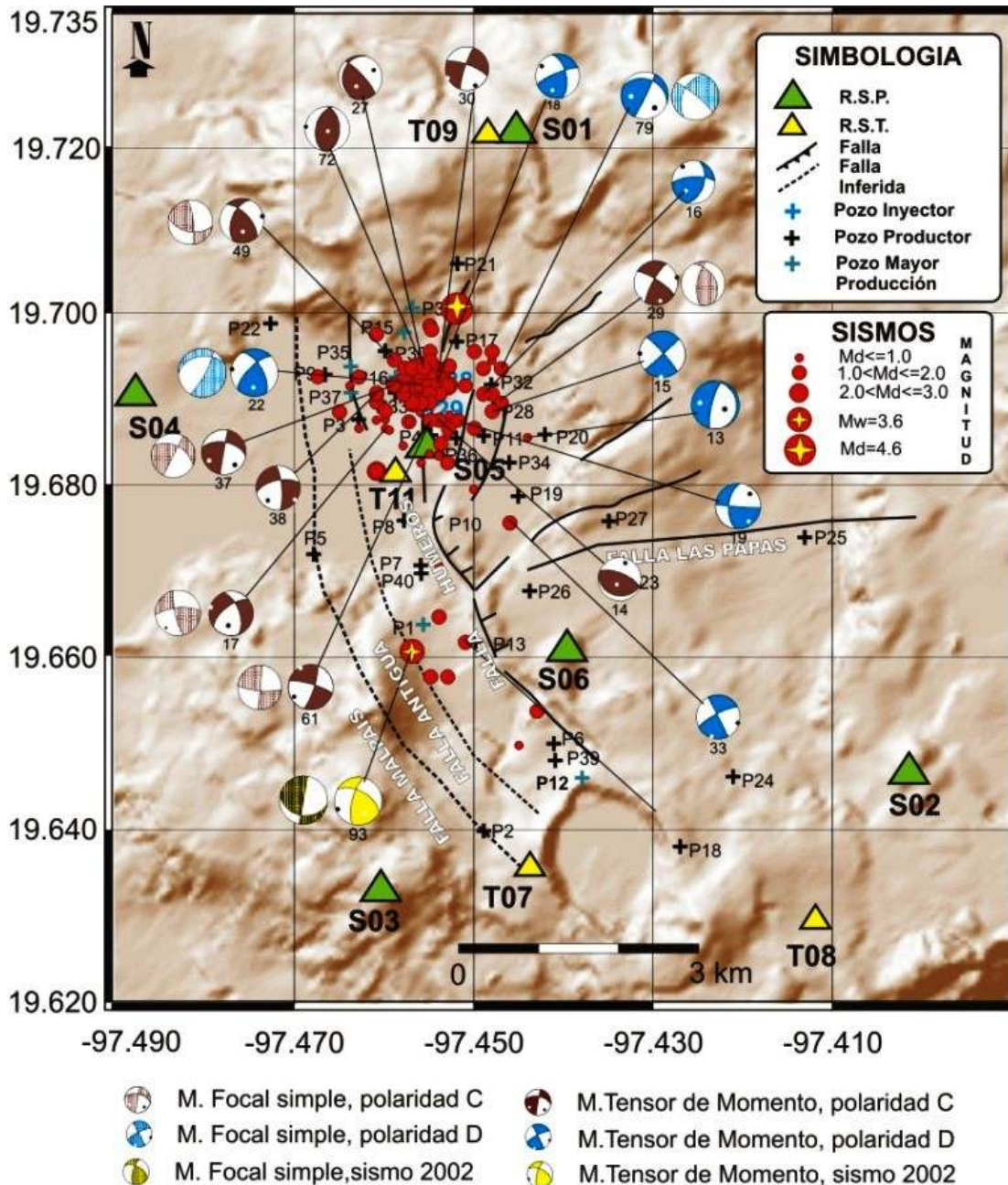


Fig. 8. Distribución de los sismos seleccionados, mecanismos focales simples y de tensor de momento con polaridad compresional y dilatacional. La numeración de los sismos corresponde a los números de la Tabla 2.

Al igual que se observó con las soluciones de mecanismos focales simples, los de tensor de momento presentan una variedad de tipos de fallamientos. En general, los mecanismos que parecen predominar en el campo son de transcurrancia lateral derecha e izquierda, característica similar a lo observado en el campo de gas de Carthage Cotton, Texas (Rutledge *et al.*, 2004). Esto sugiere de nuevo que los esfuerzos causantes de las fallas son heterogéneos y que pueden estar asociados a los procesos de inyección y producción, aunque varios de los sismos tienen seguramente un origen netamente tectónico.

5.3. Estado de esfuerzos

Para conocer el estado de esfuerzos del campo se ha utilizado parte de la información obtenida del proceso de inversión del tensor de momento, es decir, el azimut, el buzamiento y los ejes de presión y tensión de ambos planos nodales (A, B) que aparecen en la Tabla 2. Para representar la distribución de los ejes (T, P) en el perfil estratigráfico orientado en dirección E-W de Los Humeros, se utilizó el programa RAKE (Louvari, 1995). Asimismo, para conocer la orientación preferencial de estos ejes se ha realizado la proyección estereográfica en el plano inferior de Schmidt y en el diagrama de rosas (Antayhua, 2007).

Sismo número	Nº Est.	Azimut (°) A/B	Buzamiento (°) A/B	Desplazamiento	M ₀ (dina-cm)	M _w (°)	Var. Red. (%)	T (°) Az/Buz	P (°) Az/Buz
4	1	92/352	81/14	-129/-39			86	211.4/26.8	326.9/40.4
5	1	274/5	89/83	173/1			93	229.6/10.7	139.4/0.8
6	1	106/16	86/86	176.4			77	331.1/2.8	240.9/2.8
10	1	267/3	77/68	157/14			81	255.6/30.5	161/7.7
13	2	194/342	78/14	-83/-121	6.85x10 ¹⁸	1.9	69	277.8/32.6	113.5/56.4
14	2	292/100	67/24	95/79	8.09x10 ¹⁹	2.6	61	210.9/67.7	18.4/21.9
15	2	48/318	89/84	174/-1	2.42x10 ¹⁹	2.2	53	182.8/4.2	273.2/4.2
16	2	267/17	69/49	135/28	1.45x10 ¹⁹	2.1	45	223/46.4	326.5/12.5
17	2	232/340	63/59	35/148	7.48x10 ¹⁸	1.9	70	286.9/2.6	194.4/43.4
18	2	248/347	78/57	146/15	7.44x10 ¹⁹	2.5	58	201/34.5	302.2/15.8
19	2	94/186	88/56	34/178	2.09x10 ¹⁹	2.2	50	145.1/21	44.5/25.6
22	3	226/329	68/61	149/25	4.74x10 ¹⁸	1.8	34	185.4/37.5	278.9/4.5
24	1	352/243	65/55	39/148			75	211.5/44.7	115.5/6.1
25	1	292/179	61/55	138/37			91	54.2/3.7	148.4/48.6
26	1	228/319	85/84	174/5			89	183/11.5	273.9/4.4
27	2	317/193	78/20	73/145	7.62x10 ¹⁹	2.6	47	206.3/53.9	61.1/30.9
28	1	188/284	81/56	146/11			70	140.7/30	240.3/16.2
29	2	302/209	78/78	13/168	8.47x10 ¹⁸	2.6	65	165.7/18.4	75.3/1.3
30	2	198/290	81/75	16/171	4.22x10 ¹⁹	2.4	51	244.3/2.4	153.7/15.2
32	1	191/286	81/66	156/10			95	144.8/26.8	241.6/13.3
33	2	333/243	89/78	12/179	1.45x10 ¹⁹	2.1	49	198.6/8.5	107.4/8.5
37	2	190/281	89/53	37/179	1.85x10 ¹⁹	2.1	44	241.8/24.2	139/26.2
44	1	314/214	72/62	30/160			81	176.6/33.5	82.2/6.6
49	2	317/202	62/51	45/143	2.36x10 ¹⁹	2.2	67	174.9/50.5	77.3/6.2
54	1	210/313	69/61	31/155			86	263.3/6.0	168.7/37.7
56	1	217/311	81/67	23/170			83	266/10	171.7/23.3
61	2	286/18	78/78	12/168	3.25x10 ²⁰	2.9	53	332.2/1.9	241.7/15.2
72	2	193/359	46/45	100/80	9.67x10 ¹⁹	2.6	44	181.5/82.9	276.1/0.6
75	1	60/165	69/55	142/26			67	18.1/40.4	115.1/8.2
78	1	341/250	89/71	19/179			66	207.1/15.4	114/11.2
79	2	26/290	86/31	59/173	5.5x10 ¹⁹	2.5	42	267.5/40.6	142/34.2
80	1	272/181	89/56	34/178			72	141.9/24.4	41.3/22.2
82	1	203/358	55/38	105/70			61	157.3/74.8	282.3/8.9
93	2	194/299	69/55	142/26	3.22x10 ²¹	3.6	67	152.1/40.4	249.1/8.2

Nº Est. es el número de estaciones utilizadas para la inversión; el azimut, buzamiento y ángulo de desplazamiento de los planos de falla A y B están en grados; M₀ es el momento sísmico en dinas-centímetro y M_w la magnitud de momento en grados; Var. Red. es la reducción de la varianza en porcentaje; T y P los ejes de tensión y presión, de cada uno de los cuales se da su azimut y su buzamiento en grados. La diferencia en color representa a sismos registrados con polaridad de onda P compresional (color negro) y dilatacional (color azul)

Tabla 2. Solución numérica de los planos de falla obtenidos de la inversión del tensor de momento.

En la Figura 9a se presenta la distribución de los esfuerzos de P (flechas de color rojo) y T (flechas de color azul) y se observa que los ejes de presión presentan orientaciones preferenciales NW-SE, en menor medida E-W y escasamente NE-SW. Los esfuerzos tensionales en cambio tienen orientaciones muy variables. Los círculos en color café y azul, diferencian a los sismos de tipo compresional (cuatro) de los de tipo dilatacional (cuatro también) respectivamente. Por otro lado, en el recuadro de la figura (Fig. 9b) se presenta la proyección estereográfica de los ejes de P y T en el diagrama de rosas. Ahí se observa que el esfuerzo máximo principal de presión (eje P) asociado al esfuerzo local, está orientado principalmente en dirección NE-SW, mientras que el esfuerzo mínimo principal (eje T), asociado al esfuerzo regional, se orienta en dirección prácticamente N-S (Antayhua, 2007). Estas direcciones coinciden con la orientación del esfuerzo observado en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano, de acuerdo con Suter *et al.* (1997) y con García-Palomo (2002). Esto implica que sin duda parte de los sismos procesados tuvieron un origen tectónico.

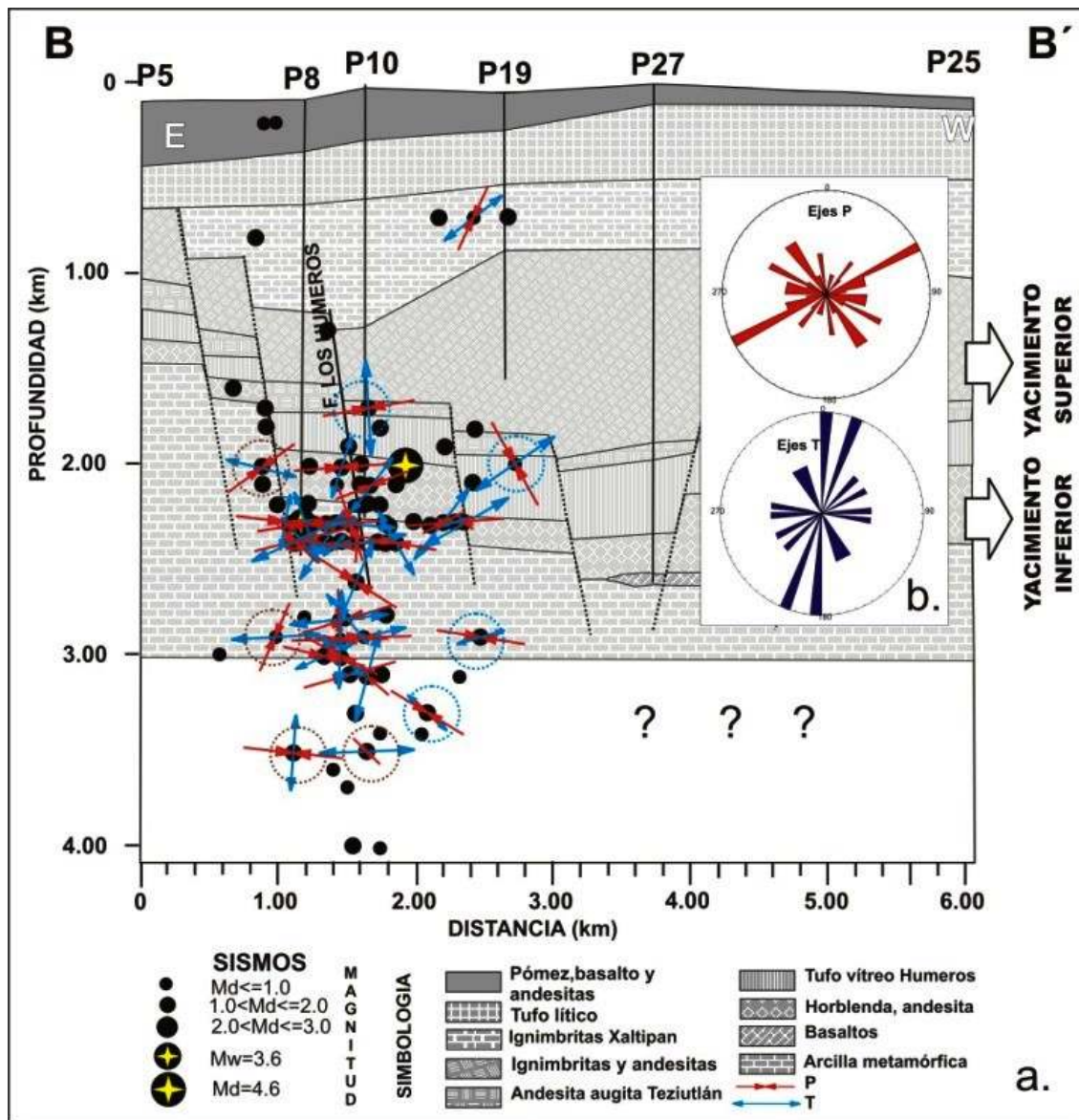


Fig. 9. Distribución en profundidad de los esfuerzos generados en el campo de Los Humeros. Las flechas en colores rojo y azul representan a los ejes de presión (P) y tensión (T), registrados en la estación S05 con polaridad C (círculo café) y D (círculo azul).

6. Relación de los sismos con los pozos y la tectónica local

Para dilucidar si había alguna relación entre el número de eventos, por un lado, y la cantidad de vapor producida y la de agua inyectada, por el otro, se utilizó la información sísmica local registrada en las estaciones S05 (ubicada en la ZN del campo) y S06 (ubicada en la ZS), así como los datos de inyección de los pozos I29 (H-29) e I38 (H-38) y de producción en los pozos que más producen, y que son: P1 (H-1), P-9 (H-9), P12 (H-12), P15 (H-15), P16 (H-16), P31 (H-31), P35 (H-35) y P37 (H-37). Se consideraron como eventos sísmicos locales aquellos cuya diferencia en tiempo de arribo de las ondas S y P era menor o igual a 3.5 segundos ($T_s - T_p \leq 3.5$ s). La elección de las dos estaciones mencionadas se hizo porque se encuentran en una ubicación adecuada y han estado en operación en el mismo lugar desde su instalación original hasta la actualidad. Aunque se dispone de datos sísmicos desde 1997, la estadística abarca únicamente de enero de 1999 a julio 2005.

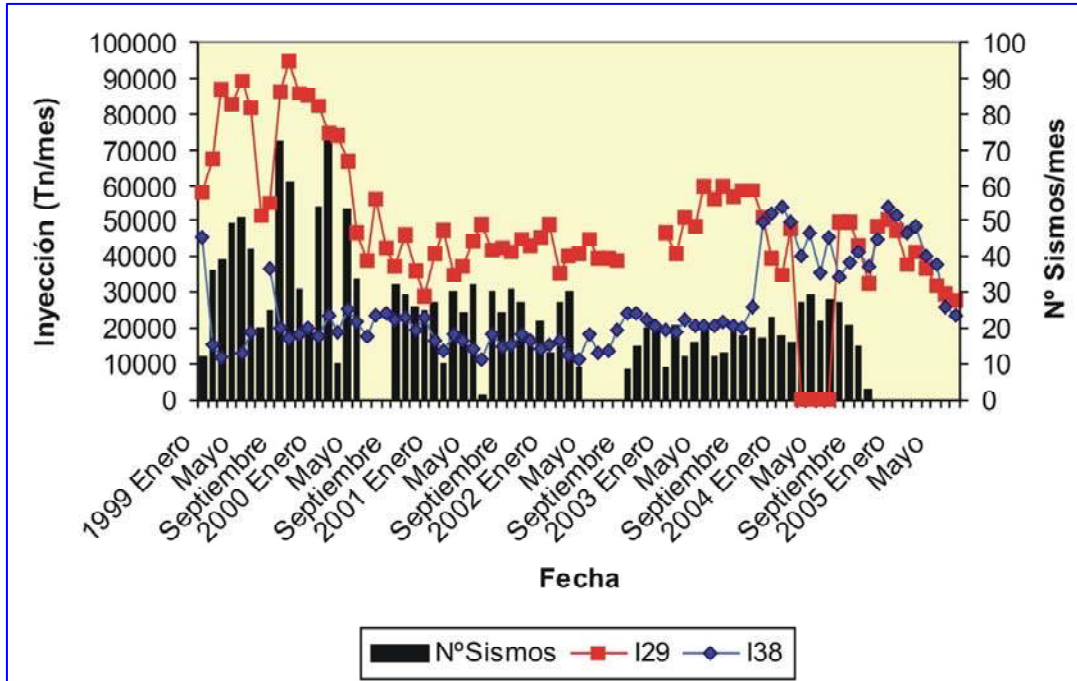


Fig. 10. Número de sismos por mes registrados en la estación S05 y cantidad de agua inyectada en los pozos H-29 (I29) y H-38 (I38) en toneladas al mes.

En la Figura 10 se presenta el número de sismos por mes registrados en la estación S05 y la cantidad de agua inyectada, expresada en toneladas por mes. Puede verse que entre mayo de 1999 y mayo de 2000 a un aumento en la cantidad de agua inyectada en el pozo I29 corresponde un aumento en el número de sismos registrados en esa estación, y viceversa. La correspondencia se pierde entre mayo y septiembre de 2003, ya que el nuevo incremento en la cantidad inyectada en ese pozo no se refleja en un mayor número de eventos por mes. Pero al aumento en la inyección en el otro pozo I38, ocurrido entre enero y septiembre de 2004, parece corresponder un incremento relativo en el número de eventos registrados, sobre todo entre mayo y octubre.

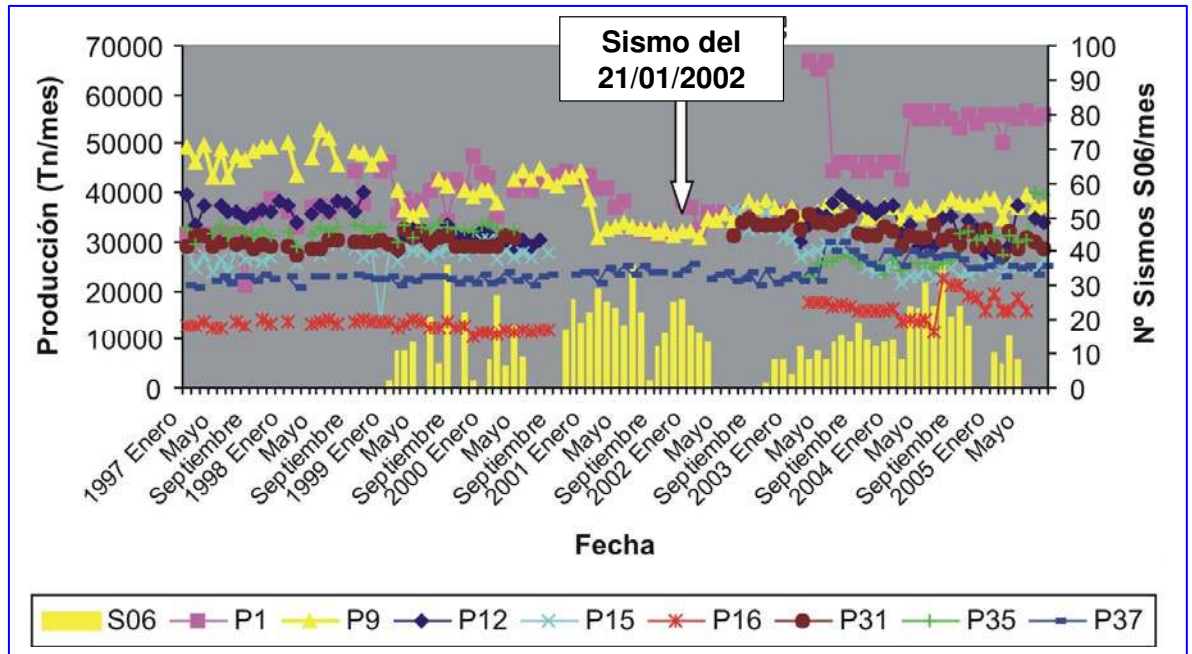
En la Figura 11 se muestra la producción de vapor en los 8 pozos productores mencionados (P1, P9, P12, P15, P16, P31, P35, P37) y la cantidad de sismos registrados en la estación S06. Puede notarse cierta correspondencia entre el aumento en el número de eventos de septiembre de 1999 y mayo de 2000 con un incremento en la producción de los pozos P1 y P9, así como entre el mayor número de eventos registrados aproximadamente entre mayo y septiembre de 2004 y el incremento de la producción de los pozos P1 y P16 que ocurrió por esas mismas fechas. También se indica en la figura la ocurrencia del sismo de magnitud moderada ($M_w = 3.6$) del 21 de enero del 2002.

7. Discusión y conclusiones

La intensa actividad sísmica registrada desde diciembre de 1997 hasta diciembre del 2004 permitió localizar 95 sismos con magnitudes $M_d \leq 3.6$ y profundidades menores a 4.0 km en el campo geotérmico de Los

Humeros. Si se comparan estos resultados con los obtenidos por Ponce y Rodríguez (1977), antes de empezar la explotación del campo, puede concluirse que se pasó de una situación sísmicamente estable a una más dinámica.

Fig. 11. Número de sismos por mes registrados en la estación S06 y cantidad de vapor producida por los pozos productores indicados.



La sismicidad registrada de diciembre de 1997 a diciembre de 2004 tiende a concentrarse en la zona norte del campo, alrededor de los pozos inyectoros I29 e I38 y sobre la traza de la falla Los Humeros. En profundidad, los sismos ocurren entre 1.8 y 4 km sugiriendo un intenso fracturamiento y/o microfracturamiento a dichas profundidades. Además, numerosos sismos se encuentran dentro del paquete de rocas sedimentarias, que generalmente han sido consideradas poco permeables. Por lo tanto, es probable que en realidad sí exista permeabilidad por lo menos en su porción superior.

De acuerdo a las soluciones de mecanismos focales y de tensor de momento, en el campo ha ocurrido un fallamiento de tipo heterogéneo, predominando el de transcurrancia lateral derecha e izquierda, similar al observado por Rutledge *et al.* (2004) en el campo de gas de Carthage Cotton en Texas.

La comparación entre el número de sismos registrados en la estación S05 con las cantidades de agua inyectadas en los dos pozos inyectoros I29 e I38 sugiere cierta correspondencia entre el aumento en la inyección y una mayor cantidad de eventos, por lo menos en ciertos periodos del total del tiempo que abarcó la comparación.

Por tanto, es posible concluir que al menos parte de la sismicidad local registrada en el campo de Los Humeros ha sido inducida por la liberación de esfuerzos locales debidos a la inyección de agua al yacimiento, lo cual puede estar favoreciendo un ligero aumento en el fracturamiento, y por tanto en la permeabilidad, del paquete de calizas que subyace a las rocas volcánicas que hospedan actualmente a los fluidos del yacimiento. Otra parte de esa sismicidad local tiene un evidente origen tectónico.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Comisión Federal de Electricidad (CFE), a la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Departamento de Exploración, a los ingenieros: Raúl Maya, Magaly Flores,

Saúl Venegas, Jesús Arredondo y Abelardo Vázquez. Asimismo, agradecen las correcciones y sugerencias del Dr. Gerardo García Estrada y del Ing. Luis C.A. Gutiérrez Negrín.

Referencias

- Ake, J., M. Mahrer, D. O'Connell and L. Block, 2005. Deep-injection and Closely Monitored Induced Seismicity at Paradox Valley, Colorado. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 95, No. 2, pp. 664-683.
- Antayhua, Y., 2007. Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros-Puebla (1997-2004), su relación con los pozos y la tectónica local. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México. 136 pp. Inédito.
- Arellano, V.M., A. García, R.M. Barragán, G. Izquierdo, A. Aragón y A. Pizano, 2000. Distribución inicial de presión y temperatura del campo geotérmico de Los Humeros. *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas-Comisión Federal de Electricidad*, 450 pp.
- Campos-Enríquez, O. y J. Arredondo-Fragoso, 1992. Gravity study of Los Humeros caldera complex, Mexico; structure and associated geothermal system. *Journal Volc. Geotherm. Research*, Vol. 49, pp. 69-90
- Cedillo, F. (2000). Hydrogeological model of the geothermal reservoirs from Los Humeros, Puebla, México. *Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan*. May 28-June 10, pp. 1639-1644.
- 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. *Memorias de la I Conferencia Internacional de Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica*, Santiago de Cuba, Cuba, pp. 1-4.
- COMESA, 1998. Informe sismológico final (Vibrosismo). Sísmica 2D. Campo Geotérmico de Los Humeros. Informe RHU-002/98 para la Comisión Federal de Electricidad. Inédito.
- Dix, C.H., 1995. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, Vol. 20, pp. 68-86.
- Dreger, D.S., 2002. Time-Domain Moment Tensor Inverse Code (TDMT_INVC). Version 1.1. University of California, Berkeley Seismological Laboratory (BSL). 18 pp.
- Fernández, S., A. Uribe, J.C. Flores y R. Gómez, 1996. Estudio sismológico en el área del temblor de Xalapa de 1920. *Memorias del VII Simposium de Geofísica y Exploración*, Veracruz, Ver. pp. 365-370.
- García-Palomo, A., 2002. Vulcanismo y geología estructural de la región de Apan, Edos. de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México. Tesis de Doctor en Vulcanología, Universidad Nacional Autónoma de México. 181 pp. Inédito.
- Gupta, K., 2002. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews*, Vol. 58, pp. 279-310.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 1982. Litología y zoneamiento hidrotermal de los pozos H 1 y H 2 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. CFE, Informe interno 23/82, Depto. Exploración. Inédito.

- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., and J.L. Quijano-León, 2005. Update of geothermics in Mexico. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- Havskov, J. and L. Ottemoller, 2003. *SEISAN. The earthquake analysis software. Versión 8.0. Preliminary*. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Bergen, Norway. 250 p.
- Jost, M.L., and R. Herrmann, 1989. A Student's guide to and review of moment tensors. *Seis. Res. Lett.* Vol. 60, pp. 37-57.
- Lee, W., R. Bennet, and L. Meagher, 1972. *A method for estimating magnitude of local earthquake from signal duration*. U.S. Geological Survey, Open File Report.
- Lermo, J., J. Guerrero, J. Soto y G. Machorro, 1999. Procesado e interpretación de datos sísmicos de la red sísmológica del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. *Memoria del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Veracruz, México, pp. 127-136.
- Lermo, J., J. Soto, C. Lorenzo, H. Mijares y J. Flores, 2001. Estudio de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Fase III. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Informe Técnico DEX-HU-02/01. Inédito.
- Lermo, J., C. Lorenzo, W. Kemper y H. Kemper, 2002. Mantenimiento preventivo y calibración del equipo electrónico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Informe Técnico GF-HU-00/2002. Inédito.
- Lermo J., C. Lorenzo, G. Espitia y Y. Antayhua, 2005. Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Instrumentación y operación de la Red Sísmológica. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Informe Técnico GF-HU-01-05. Inédito.
- Louvari, H., 1995. *Calculate the parameters of the second nodal plane and the parameters of P and T axes. Stress orientation*. University of Thessaloniki, Greece, Geophysical Laboratory, 22 pp.
- Pérez-Reynoso, J., 1978. Geología y petrografía de Los Humeros. *Geomimet*, Vol. 91, pp. 97-106.
- Ponce, L. y C. Rodríguez, 1977. Microearthquake activity associated to Los Humeros caldera, Mexico: Preliminary survey. *Geofísica Internacional*, Vol. 17-4, pp. 461-478.
- Reasenber, P., and D. Oppenheimer, 1985. *FPPFIT, FPPLLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions*. U.S. Geological Survey. Open File Report N° 85-739.
- Rutledge, J.T., W.S. Phillips, and M.J. Mayerhofer, 2004. Faulting Induced by Forced Fluid Injection and Fluid Flow Forced by Faulting: An Interpretation of Hydraulic-Fracture Microseismicity, Carthage Cotton Valley Gas Field, Texas. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94-5, pp. 1817-1830.
- Seismocontrol, 2005. Estudio de resistividad con transitorio electromagnético en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. CFE, Gerencia de Proyectos Termoeléctricos, Informe GF-HU-08-05. Inédito.

- Suter, C., J. Contreras-Pérez, and H. Ochoa-Carrillo, 1997. Structure of the Sierra Madre Oriental Fold-thrust belt in east central Mexico. *II Convención sobre la Evolución Geológica de México, Pachuca-Hidalgo. Libro guía de las excursiones geológicas*. Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 45-66.
- Viggiano, J.C. y J. Robles, 1988. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Tomo I: Sus usos como indicadora de temperatura del régimen hidrológico. *Geotermia*, Vol. 4, pp. 24-33.
- Yáñez-García, C., S. García-Durán, and J. Casique-Vásquez, 1979. Geothermic exploration in the Los Humeros-Derrumbadas area. *Geothermic Research Count. Trans.* Vol. 3, pp. 801-803.