

# SISMICIDAD EN CAMPOS GEOTÉRMICOS DE MÉXICO

Javier Lermo<sup>1</sup>, Edgar Urban<sup>1</sup> & Yanet Antayhua<sup>2</sup>

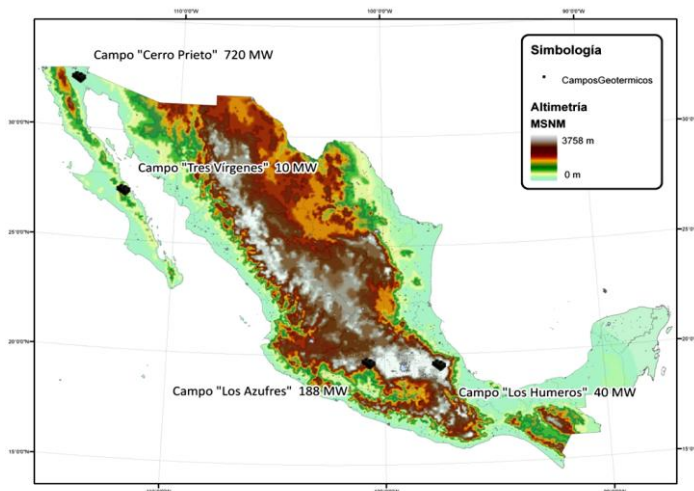
<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México.

[jles@pumas.iingen.unam.mx](mailto:jles@pumas.iingen.unam.mx)

<sup>2</sup>Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Av. Canadá N° 1470, San Borja –Lima.

## INTRODUCCIÓN

El estudio y monitoreo de la microsismicidad en campos geotérmicos, se ha llevado a cabo en varios lugares del mundo (Valdés, 2009; Rutledge et al., 2002; Rodríguez, 2002; Phillips et al., 2002; Eberhart-Phillips et al., 1984; entre otros), estos estudios han propuesto modelos de comportamiento de los yacimientos con base al análisis de la microsismicidad y han sido correlacionados con las operaciones continuas de inyección, la extracción de vapor, además de otros procesos como la estimulación, la perforación y la activación de sistemas de fallas. En este estudio, se analiza, en conjunto, la sismicidad registrada entre 1997 y 2010, en los campos geotérmicos de Los Humeros (Puebla), Los Azufres (Michoacán), Las Tres Vírgenes (Baja California Sur, BCS) y Cerro Prieto (Baja California Norte, BCN) (Fig. 1), se zonifica según su ubicación (zona de pozos inyectoras, productores y periferie) y se correlaciona con las operaciones de inyección, explotación del recurso geotérmico y con los sistemas de fallas presentes en los cuatro geotérmicos de México.



**Fig. 1.-** Ubicación geográfica de los cuatro campos geotérmicos principales de México y estimación de energía generada en megawatt (MW).

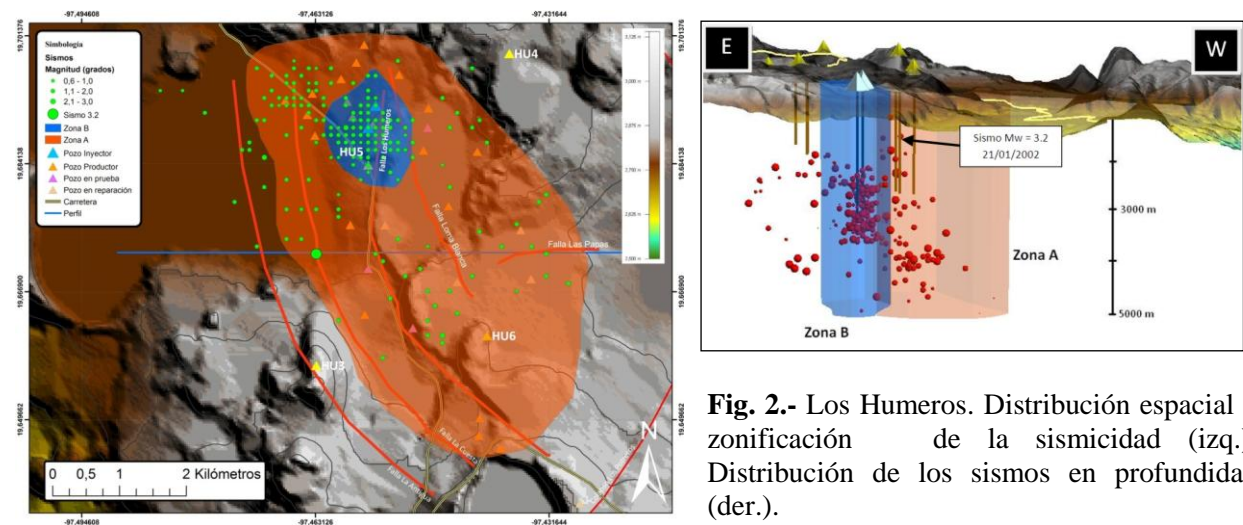
## DATOS Y PROCESAMIENTO

La información sísmica corresponde a los registrados en los períodos: 1997- 2008, en Los Humeros (Lermo et al., 2008; Antayhua (2007), 2008-2009 en Los Azufres (Lermo et al., 2009; Valdés et al. 2009; Rodríguez, 2000), 1994-2001 en Cerro Prieto (Fabriol y Munguía, 1997; Rebollar et al., 2003). La localización hipocentral de los sismos fueron realizados con seisán v8.3 (Havskov and Ottemoller, 2003). Los resultados del procesamiento muestran que en total se han localizado 237 sismos locales en Los Humeros, 129 sismos en Los Azufres, 125 en las Tres Vírgenes y 380 sismos en Cerro Prieto (recopilados de Fabriol y Munguía (1997), Rebollar et al. (2003)). En general, los parámetros hipocentrales (latitud, longitud, profundidad focal) han sido estimados con errores menores a 3 km y  $RMS \leq 0.7$ . La profundidad de los hipocentros se concentran principalmente entre 0.6 y 12 km y presentan magnitudes entre -0.3 y 4.6, magnitudes típicas de sismicidad local en zonas geotérmicas y volcánicas.

## DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD

### CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS (PUEBLA)

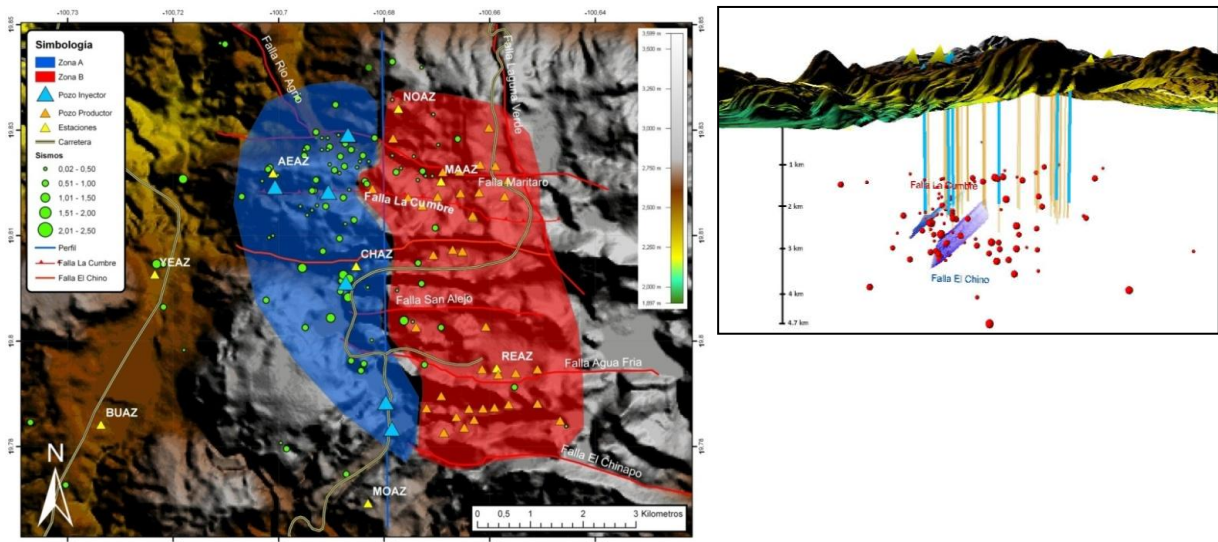
En el campo geotérmico de Los Humeros (Puebla), la correlación entre la sismicidad y los procesos de inyección y/o reinyección han sido ampliamente analizados por Antayhua (2007) y Lermo et al. (2008) mediante la estadística de ocurrencia de sismos, mecanismos focales, tensor de momento y distribución de estado de esfuerzos, llegándose a la conclusión que el mayor porcentaje de sismos son inducidos por el proceso de inyección y que el incremento o disminución están en función de la cantidad de gasto. Además existen mecanismos termoporoelásticos que intervienen en el fracturamiento de los poros. Las zonas de alta presión y temperatura han influido en un fracturamiento adicional no considerado (Ghassemi, 2007); un indicador de este fenómeno es la numerosa microsismicidad concentrada en la zona de mayor temperatura en el campo Los Humeros; aunque no se ha fijado el porcentaje de los sismos asociado al efecto, la zona norte del campo reúne los mecanismos necesarios para su manifestación, (alta temperatura y presión), parámetros que sugieren la presencia del fenómeno de termoporoelasticidad.



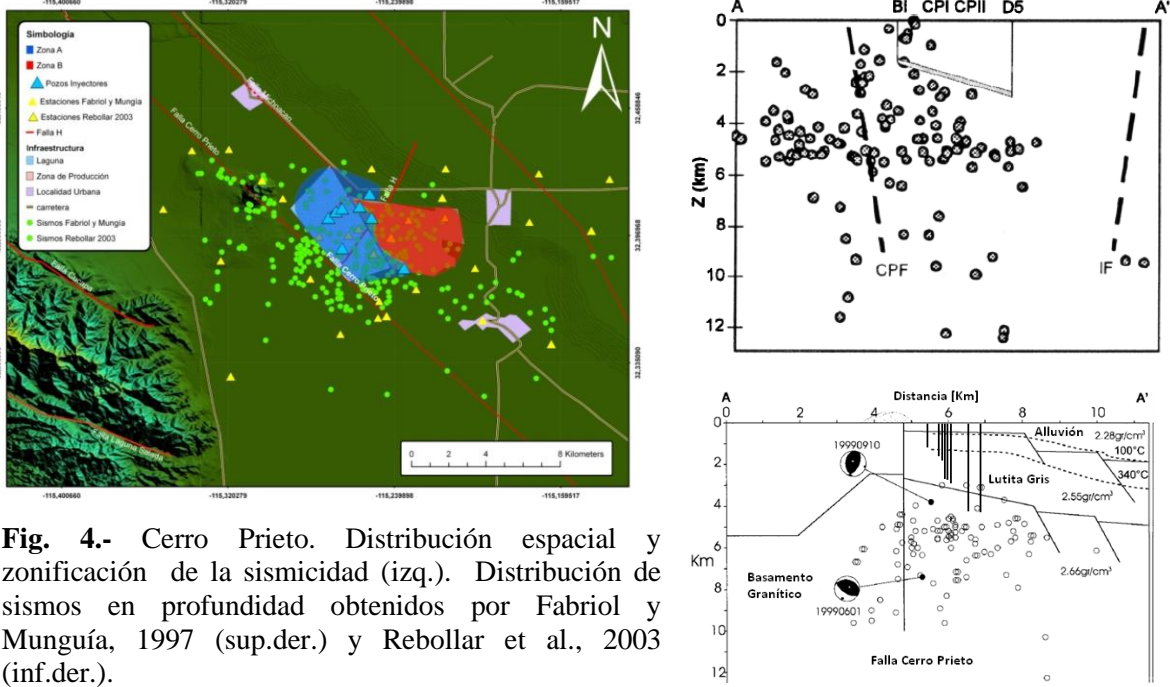
**Fig. 2.-** Los Humeros. Distribución espacial y zonificación de la sismicidad (izq.). Distribución de los sismos en profundidad (der.).

### CAMPOS GEOTÉRMICOS DE LOS AZUFRES (MICHOACÁN) Y CERRO PRIETO (BCN)

Aun, cuando la zonificación de la sismicidad en Los Azufres (Fig. 3) y Cerro Prieto (Fig. 4) muestra un porcentaje mayor en la zona de pozos inyectoros con respecto a la zona de pozos productores; obviamente, no implica que la sismicidad ocurrida en esta zona esté correlacionada directamente con la inyección de fluido geotérmico; sin embargo, no se descarta que tenga alguna implicancia en la activación de las fallas circundantes; ejemplo de ello podrían ser las fallas La Cumbre, en el campo geotérmico de Los Azufres.



**Fig. 3.-** Los Azufres. Distribución espacial y zonificación de la sismicidad (izq.). Distribución de los sismos en profundidad (der.).



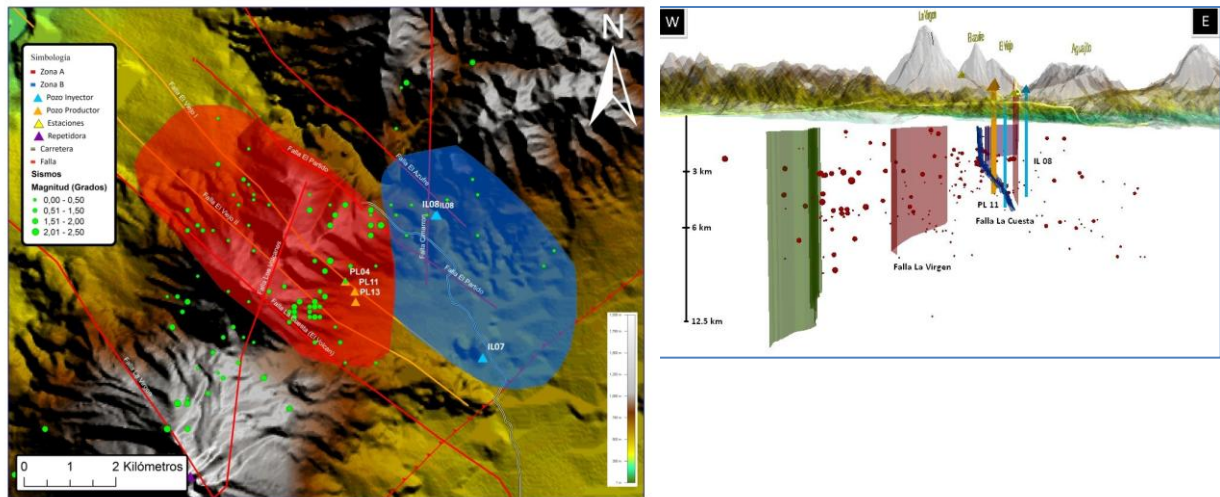
**Fig. 4.-** Cerro Prieto. Distribución espacial y zonificación de la sismicidad (izq.). Distribución de sismos en profundidad obtenidos por Fabriol y Munguía, 1997 (sup.der.) y Rebollos et al., 2003 (inf.der.).

**CAMPO GEOTÉRMICO DELAS TRES VÍRGENES (BCS)**

En el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, la sismicidad en la zona de pozos inyector es mínima con respecto a la zona de pozos productores. Según los estudios del monitoreo sísmico realizados por Lermo et al. (2011) el mayor número de sismos estaría correlacionado a la actividad tectónica local; en cuanto a la sismicidad presente en la zona de los pozos productores estarían correlacionados, básicamente, a la estimulación ácida del pozo LV-06, la perforación y la extracción del vapor geotérmico.

los





**Fig. 2.-** Comparación de los valores promedio de  $Q_c$  obtenidos en el volcán Huaynaputina, con otros valores obtenidos en zonas volcánicas y zonas relativamente estables (según Tabla 2).

## CONCLUSIONES

El análisis de la sismicidad en Los Humeros, Los Azufres y Cerro Prieto estaría asociado a los procesos de inyección; seguido de la actividad tectónica regional y en menor número a la producción de vapor geotérmico. A diferencia de estos campos, en Las Tres Vírgenes, el mayor porcentaje de la sismicidad se correlaciona con los procesos de estimulación ácida, perforación, explotación del recurso geotérmico y la activación de sistemas de fallas.

## REFERENCIAS

- Antayhua, Y., 2007. Sismicidad en el campo Geotérmico de los Humeros-Puebla (1997-2004), su relación con los pozos y la tectónica local, Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, pp.128.
- Eberhart-Phillips D., and Oppenheimer D. H., 1984. Induced Seismicity in The Geysers Geothermal Area, California. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, No. B2, p 1191-1207.
- Fabriol H., y Munguía L., 1995. Seismic activity at the Cerro Prieto geothermal area (Mexico) from August 1994 to December 1995, and its relationship with tectonics and fluid exploitation, *Geophysical Research Letters*, Vol. 24, Num 14, p 1807-1810,
- Lermo, J., Antayhua Y., Quintanar L., y Lorenzo C., 2008. Estudio sismológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos, *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 21, No. 1, p 25-41.
- Lippmann M, Truesdell A., Halfman S., y Mañon., A, 1991. A Review of the Hydrogeologic-Geochemical Model for Cerro Prieto, *Geothermics*, Vol. 20, p 39-52.
- Munguía, L., y Wong, V., 1995. Estudio de sismicidad en la zona geotérmica las Tres Vírgenes, baja California Sur. En: Medina-Martínez, F., Delgado-Argote, L.A.
- Phillips, S. W., Rutledge, T., House, L. S., and Fehler, M.C., 2002. Induced Microearthquake Patterns in Hydrocarbon and Geothermal Reservoirs: Six Case Studies. *Pure and App. Geophys.*, Vol. 159, p 345-369.

Rebollar J., Reyes L., Quintanar L., y Arellano J., 2003. Strees Heterogeneity in the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, p 783-794.

Rodríguez, M., Cuenca, J., y Gómez, G., 2001. Estudio de la Actividad Sísmica del Campo Geotérmico de los Azufres, Michoacán. Reporte elaborado para Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.

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.

Segall, P., 1989. Earthquakes Triggered by Fluid Extraction, Geology, Vol. 17, No. 1, p 942-946.

Suarez M.C., 2009. La termoporoelasticidad en geotérmica formulada en cuatro dimensiones, Congreso Anual 2009, Asociación Geotérmica Mexicana.  
Valdés.

Valdez C., 2009. Estudio de sísmica pasiva en el campo Geotérmico de Los Azufres, Mich., Informe elaborado para la Comisión Nacional de Electricidad, DEX-DGF-AZ-16-09.