



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

RELACIÓN DE LA ACTIVIDAD SISMICA LOCAL,  
POZOS INYECTORES Y FALLAS ACTIVAS,  
EN LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS DE MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

EDGAR URBÁN RASCÓN

DIRECTOR DE TESIS:

M EN C JAVIER LERMO SAMANIEGO



2010

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Fernando Samaniego Verduzco.

Secretario: Dr. Ricardo J. Padilla y Sánchez.

Vocal: M. en C. Javier Lermo Samaniego.

1er. Suplente: Dr. Martín Cárdenas Soto.

2do. Suplente: M.I. David Escobedo Zenil.

**Lugar donde se realizó la tesis:**

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

M. en C. Javier Lermo Samaniego

**Por mi papá y mamá,  
Raúl Urbán y Ana Alicia Rascón,  
así como han estado siempre por mí,  
yo siempre estoy y estaré por ellos,  
un hijo nunca olvida.**

## Dedicatoria

En momentos y circunstancias cuando he buscado ejemplos a seguir, mi hermano **Raúl Urbán**, siempre ha sido un ejemplo para mí.

Porque como en la vida y en el *football* hay personas que te acompañan en la adversidad, se sacrificarían a sí mismos por tí y saber que tú harías lo mismo por ellos en la continua lucha; por mis hermanos de Pumas CU, UNAM y los *coaches* que me han apoyado, **Diego Galicia, Isaac Lara, Giovanni Pérez, Víctor Sánchez...**

Dedicada a mi **familia Urbán** todos y cada uno de ellos; desde pequeño siempre he sabido a qué lugar pertenezco y quienes han sembrado las raíces donde he crecido, una homenaje en especial a mi abuelo **Fernando Urbán**, siempre interesado en mi preparación, y por nunca dejar pasar las palabras “Eres un gran orgullo para mí”; mi tío **José Urbán**, por ser de las personas que más admiro y el saber que está conmigo por sobre todo; **Citlali Muster**, porque ella siempre está conmigo, cuando el afecto se aparta de ti, solo algunos voltean atrás y te regalan un cariño tan especial, que sobrepone todo cuando más lo necesitas, nunca lo olvidaré.

Por mi **familia Rascón**, siempre he sentido que soy parte de la continuidad de grandes personas: mis abuelos, tíos, primos, por todos aquellos que no están conmigo y sin embargo continuo aprendiendo de ellos, por toda mi familia les dedico todo en mi absoluto.



## **Agradecimientos**

Agradezco a la Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, con residencia en los campos Los Azufres, Los Hornos y Tres Vírgenes, a través de los estudios y monitoreo de la actividad sísmica pasiva, durante los periodos 2007 al 2010 por el apoyo otorgado en la realización de esta tesis, permitiendo el uso de los datos propiedad de la empresa e información relacionada directamente con los campos geotérmicos de México.

A mi tutor, M. en C. Javier Lermo Samaniego, por la guía y dirección de esta tesis; además del continuo apoyo en mi desarrollo profesional.

Agradezco a los sinodales el tiempo dedicado en la revisión de esta tesis, y un respetuoso agradecimiento al Dr. Fernando Samaniego por la extensa revisión de esta tesis.

Amigos de la facultad e Instituto de Ingeniería de la UNAM, que me han acompañado en el corto y largo sendero.

Gracias a nuestra universidad.

**“Solo lo absoluto merece el acompañamiento de la eternidad.”**

**José Vasconcelos**

## Índice

<b>Resumen.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Marco de referencia .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Geotermia en el mundo .....	2
1.2.2 Geotermia en México.....	3
1.2.3 Campos Geotérmicos .....	4
1.2.4 Sismología pasiva .....	5
1.2.5 Relación con las operaciones de campo .....	5
<b>1.3 Metodología .....</b>	<b>6</b>
1.3.1 Análisis y procesamiento de los datos sísmicos.....	6
1.3.1.1 Adquisición, formato y manejo de datos.....	7
1.3.1.2 Determinar arribo de ondas S, P y longitud de coda Q .....	8
1.3.1.3 Programa de localización .....	8
1.3.1.4 Modelo de velocidades.....	9
1.3.1.5 Velocidad de desplazamiento de las ondas sísmicas.....	9
1.3.1.6 Ecuación para el cálculo de la magnitud de duración .....	10
1.3.1.7 Localización hipocentral .....	10
1.3.1.8 Distribución en superficie y en profundidad de los sismos .....	11
<b>2 Análisis de campos geotérmicos.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Campo Los Humeros.....</b>	<b>12</b>
2.1.1 Antecedentes .....	12
2.1.2 Geología y tectónica.....	13
2.1.3 Estudios sismológicos.....	14
2.1.4 Monitoreo sísmico .....	18
2.1.4.1 Estaciones sismológicas.....	18
2.1.5 Análisis de la actividad sísmica.....	20

## ii Índice

---

2.1.5.1	Modelo de Velocidades .....	20
2.1.5.2	Localización Hipocentral .....	20
2.1.5.3	Distribución en superficie y en profundidad de los sismos seleccionados .....	22
2.1.5.4	Relación con las operaciones de campo .....	29
2.1.5.4.1	Relación con los pozos inyectoras .....	29
2.1.5.4.2	Relación con los pozos productores .....	30
2.1.5.5	Termoporoelasticidad .....	32
<b>2.2 Campo Los Azufres.....</b>		<b>37</b>
2.2.1	Antecedentes .....	37
2.2.2	Geología y tectónica .....	37
2.2.3	Estudios sismológicos .....	39
2.2.4	Monitoreo sísmico .....	41
2.2.4.1	Estaciones sismológicas .....	41
2.2.5	Análisis de la actividad sísmica .....	43
2.2.5.1	Modelo de Velocidades .....	43
2.2.5.2	Localización Hipocentral .....	44
2.2.5.3	Distribución en superficie y en profundidad de los sismos seleccionados .....	44
<b>2.3 Campo Las Tres Vírgenes .....</b>		<b>50</b>
2.3.1	Antecedentes .....	50
2.3.2	Geología y tectónica .....	50
2.3.3	Estudios sismológicos .....	53
2.3.4	Monitoreo sísmico .....	54
2.3.4.1	Estaciones sismológicas .....	54
2.3.5	Análisis de la actividad sísmica .....	56
2.3.5.1	Modelo de Velocidades .....	56
2.3.5.2	Localización Hipocentral .....	56
2.3.5.3	Distribución en superficie y en profundidad de los sismos seleccionados .....	56
2.3.5.4	Sismicidad durante la perforación, estimulación y las pruebas de producción en el pozo LV-06 .....	56

---

<b>2.4 Campo Cerro Prieto</b> .....	<b>70</b>
2.4.1 Antecedentes .....	70
2.4.2 Geología y tectónica.....	70
2.4.3 Estudios sismológicos.....	73
2.4.4 Monitoreo sísmico .....	74
2.1.4.2 Estaciones sismológicas .....	74
2.4.5 Análisis de la actividad sísmica.....	75
2.4.5.1 Modelo de Velocidades .....	75
2.4.5.2 Localización Hipocentral .....	75
2.4.5.3 Distribución en superficie y en profundidad de los sismos seleccionado .....	75
2.4.5.4 Relación con las operaciones de campo.....	80
<b>3 Discusión de resultados</b> .....	<b>82</b>
3.1 Monitoreo de la actividad sísmica .....	82
3.2 Relación con las operaciones de campo .....	83
<b>4 Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>85</b>
<b>5 Referencias</b> .....	<b>88</b>
<b>Anexo A Tablas Datos Hipocentrales</b> .....	<b>93</b>
<b>A1 Tablas hipocentrales Campo Los Humeros</b> .....	<b>93</b>
<b>A2 Tablas hipocentrales Campo Los Azufres</b> .....	<b>99</b>
A2.1 Sismos seleccionados estudio Lermo y cols., 2009.....	99
A2.2 Sismos seleccionados estudio Valdez y cols I., 2009 .....	100
<b>A3 Tablas hipocentrales Campo Tres Vírgenes</b> .....	<b>103</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1.1.</b> Localización de los campos geotérmicos principales en México y la cantidad de energía generada en mega-watts (MW) .....	3
<b>Figura 1.2.</b> Yacimiento geotérmico típico. (Modificado del GRC, <a href="http://www.geothermalenergy.org/314,what_is_geothermal_energy.html">http://www.geothermalenergy.org/314,what_is_geothermal_energy.html</a> ) .....	4
<b>Figura 1.3.</b> Corte de un sismograma (Havskov y Ottemoller, 2003) .....	8
<b>Figura 1.4.</b> Modelo de velocidades utilizado en el campo geotérmico de Cerro Prieto (Rebollar y cols., 2003) .....	9
<b>Figura 2.1.1.</b> Geología superficial y del subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros. a) Productos volcánicos principales depositados en el campo. b) y c) Perfiles estratigráficos en las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste, según la Figura 2.1.1.a. (Antayhua 2007) .....	15
<b>Figura 2.1.2.</b> Sismograma de la estación Pozo H-21 en el campo Los Humeros .....	16
<b>Figura 2.1.3.</b> Elementos que integran una de las estaciones de monitoreo en el campo Los Humeros. Sismómetro de 3 componentes (Z, N-S y E-O): <i>Guralp</i> modelo CMG-6TD .....	18
<b>Figura 2.1.4.</b> Mapa geomorfológico con la distribución espacial de los 237 sismos. ....	23
<b>Figura 2.1.5.</b> Distribución de la sismicidad durante los periodos de estudio principales.....	24
<b>Figuras 2.1.6 y 2.1.7.</b> Zonificación del campo Los Humeros, vista en planta figura superior y porcentaje de distribución para los 237 sismos en las diferentes zonas. ....	26
<b>Figura 2.1.8.</b> Perfil sísmico E-O del campo Los Humeros.....	27
<b>Figura 2.1.9.</b> Elipses de error en la determinación de los hipocentros campo Los Humeros vista de planta y Perfil sísmico E-W.....	28
<b>Figura 2.1.10.</b> Correlación de la cantidad de inyección de agua en los pozos I29 e I38 y el número de sismos registrados en la estación S05 .....	30
<b>Figura 2.1.11.</b> Correlación de la sismicidad registrada en la estación S06 y los ocho pozos de mayor producción en el campo geotérmico de Los Humeros (Antayhua, 2007). ....	31
<b>Figura 2.1.12.</b> Perfil sísmico E-W con zonificación del campo Los Humeros.....	32
<b>Figura 2.1.13.</b> Mapa de isotermas con temperaturas de fondo, la actividad sísmica y las fallas principales en el campo Los Humeros; Perfil sísmico W-E.....	34
<b>Figura 2.1.14.</b> Vista 3D con dirección W-E y las isotermas a una profundidad de 2700 m en el campo Los Humeros. ....	35
<b>Figura 2.1.15.</b> Modelo conceptual de Los Humeros (dirección de flujo, modificado de Antayhua, 2007) .....	36
<b>Figura 2.2.1a.</b> Mapa topográfico y estructural con la ubicación del campo Los Azufres (Martínez y Nieto, 1990). <b>Figura 2.2.1b.</b> Graben de Acambay.....	38

<b>Figura 2.2.2.</b> Vista panorámica de la caseta sismológica El Mono (MOAZ).....	41
<b>Figura 2.2.3.</b> Mapa geomorfológico del campo geotérmico de Los Azufres .....	46
<b>Figura 2.2.5.</b> Perfil sísmico N-S del campo geotérmico Los Azufres .....	47
<b>Figuras 2.2.5 y 2.2.6.</b> Zonificación del campo Los Azufres, vista en planta figura superior y porcentaje de distribución para los 129 sismos en las zonas respectivas. ....	48
<b>Figura 2.2.7.</b> Elipses de error en la determinación de los hipocentros de los 23 sismos analizados por Lermo y cols., 2009 .....	49
<b>Figura 2.3.1.</b> Mapa geológico a detalle de la zona geotérmica de las Tres Vírgenes (López, 1993).....	42
<b>Figura 2.3.2.</b> Distribución espacial de los sismos (Lermo, 2005) .....	59
<b>Figura 2.3.3.</b> Distribución espacial de los sismos en el campo Tres Vírgenes, 2004–2009 .....	62
<b>Figura 2.3.4.</b> Perfil sísmico E-W.....	63
<b>Figuras 2.3.5 y 2.3.6.</b> Zonificación del campo Tres Vírgenes vista en planta figura superior y distribución en porcentaje de sismos en las diferentes zonas.....	64
<b>Figura 2.3.7.</b> Elipses de error en la determinación de los epicentros para el periodo 2009 en el campo Tres Vírgenes.....	65
<b>Figura 2.3.8.</b> Perfil sísmico E-W con la proyección de la Falla La Cuesta y el pozo PL-11.....	66
<b>Figura 2.3.9.</b> Evolución pruebas de producción del pozo LV-06 (Informe final de perforación y estimulación acida del pozo LV-06 TVB-RE-03-2010).....	68
<b>Figura 2.3.10.</b> Registro de sismos locales detectados por la estación TV-01; durante el periodo que comprende desde el mes diciembre del 2009 al mes abril del 2010. ....	69
<b>Figura 2.4.1.</b> Distribución del sistema de fallas San Andrés, formada por fallas transcurrentes con desplazamiento normal y dirección NO-SE (Herrera, 2006) .....	71
<b>Figura 2.4.2.</b> Perfil geológico con la estratigrafía en la región del Campo Cerro Prieto (Aguilar, 2009).....	72
<b>Figura 2.4.3.</b> Distribución espacial de la sismicidad dentro y fuera del campo geotérmico de Cerro Prieto (Boletín RESNOM Febrero 2008). ....	74
<b>Figura 2.4.5.</b> Mapa de distribución sísmica del campo Cerro Prieto; a) localización obtenida por Fabriol y Munguía (1997), b) localización obtenida por Rebollar 2003.....	75
<b>Figuras 2.4.6 y 2.4.7.</b> Zonificación del CGCP, vista en planta figura superior y porcentaje de distribución de los sismos en las zonas correspondientes.....	78
<b>Figura 2.4.8.</b> Perfil sísmico SW-NE (A – A') (Fabriol y Munguía, 1997) .....	79
<b>Figura 2.4.9.</b> Perfil sísmico SW-NE (A – A') (Modificado de Rebollar y cols., 2003) .....	79

**Figura 2.4.10.** Comparativa del gasto de inyección diario en el pozo 303 con la suma del momento sísmico en el día (Modificado de Fabriol y Munguía 1997).....81

**Figura 2.4.11.** Modelo Hidrológico del CGCP (Modificado de Glowacka y cols., 2005).....81

## Índice de Tablas

**Tabla 2.1.1.** Características principales de las estaciones sísmicas de la red sísmica del campo Los Humeros (Lermo y cols., 2009) .....19

**Tabla 2.1.2.** Modelo de velocidades para el campo Los Humeros .....20

**Tabla 2.2.1.** Características principales de las estaciones sísmicas de la red sísmica autónoma del campo geotérmico Los Azufres, Michoacán.....42

**Tabla 2.2.2.** Modelo de velocidades para el campo Los Azufres .....43

**Tabla 2.3.1.** Características principales de las estaciones sísmicas de la red de monitoreo sísmico en el campo Tres Vírgenes.....55

**Tabla 2.3.2.** Modelo de velocidades para el campo Tres Vírgenes.....56

**Tabla 2.3.3.** Evolución pruebas de producción del pozo LV-06 (Informe final de perforación y estimulación acida del pozo LV-06, TVB-RE-03-2010).....68

**Tabla 2.4.2.** Modelo de velocidades para el campo Cerro Prieto (Rebollar y cols., 2003) .....75

## Resumen

En las últimas décadas en explotación y aprovechamiento de los recursos energéticos contenidos debajo de la superficie terrestre, se ha observado numerosa actividad sísmica a través de las diferentes redes fijas y temporales de monitoreo sísmico en los campos geotérmicos de México, relacionando la sismicidad, las operaciones de explotación y el sistema hidrotermal, se distinguen las actividades de mayor impacto en la generación de eventos y cambio de esfuerzos.

En Los Hornos desde el año 1997 hasta el 2008, se concentraron numerosos sismos en la traza de las fallas NE-SW y alrededor de los pozos inyectoros, localizados en la periferia de la zona de mayor temperatura en el yacimiento, lo que sugiere una estrecha relación entre la sismicidad y el ingreso de fluidos por conducto de los pozos inyectoros. Adicional al producido por la inyección y el fracturamiento hidráulico se observa actividad sísmica asociada al fracturamiento en el esqueleto rocoso, fenómeno originado por la expansión y dilatación de los poros en la roca, debido a la variación en la presión y temperatura.

Los Azufres, se analizó durante los años 2008 y 2009, complementando el modelo estructural se adiciona actividad sísmica asociada a las Falla La Cumbre y El Chino, se observa numerosa actividad relacionada los pozos inyectoros y nula respecto a los pozos productores.

En el campo Las Tres Vírgenes, se estudio la sismicidad desde el 2003 hasta el 2010, asociando gran parte de la actividad sísmica a la estimulación y pruebas de producción en 2 pozos productores, se relaciona la mayor cantidad de

sismos al sistema tectónico regional, fallas La Virgen, El Volcán, El Partido y La Falla Cimarrón, con notorias acumulaciones en las fallas La Cuesta y El Partido, cercanas al pozo inyector y al pozo productor monitoreado durante su perforación.

Por último se relaciona la actividad sísmica en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, donde la sismicidad se agrupa principalmente en la zona de explotación y a un kilometro de profundidad de los intervalos de inyección y producción, en lo que refiere a las estructuras geológicas se observa actividad cercana al sistema de fallas normales (sistema H o Morelia) y Falla Cerro Prieto.



## **1. Introducción**

Dentro de los grandes e importantes retos que se presentan en la actualidad, la generación de energía es primordial para el desarrollo de un país. Vivimos una época de trascendencia donde no solo es importante satisfacer las demandas energéticas de la población, sino llevarlas a cabo en forma integral con el cuidado del medio ambiente. La energía proveniente de la tierra ha demostrado ser una opción importante en el abastecimiento y rentabilidad de la demanda energética.

### **1.1 Objetivos**

Los objetivos de este estudio son:

1. Monitoreo y análisis de la actividad sísmica en los cuatro campos geotérmicos principales de México, Los Humeros, Puebla, Los Azufres, Michoacán, Tres Vírgenes, Baja California Sur y Cerro Prieto en Baja California Norte.
2. Estudiar la relación entre la actividad sísmica local y los pozos en perforación, así como los que se encuentran en operación de forma continua, (pozos inyectores y productores) en los campos geotérmicos principales de México.
3. Presentar los diversos resultados obtenidos en cada uno de los casos analizados.

### **1.2 Marco de referencia**

#### **1.2.1 Geotermia en el mundo**

El inicio de la Geotermia, comienza en el siglo XIX, en Lardello. Italia; con la intención de extraer ácido bórico, se evaporaba el agua caliente de los manantiales utilizando el carbón como combustible. Evento que marca el comienzo del desarrollo enfocado al aprovechamiento de los recursos geotérmicos. En 1867, Francesco Larderel, inventó un proceso de evaporación utilizando la energía del agua caliente, para producir energía mecánica a través de un sistema de bombeo de agua con una inyección de vapor, que permitiría más adelante construir bombas centrífugas y reciprocantes.

Para el año 1904, Piero Ginori Conti, construye el primer generador eléctrico accionado por vapor de origen geotérmico, marcando así la brecha que permitirá un rápido crecimiento de la industria, deslumbrando su gran potencial; 15 años más tarde, en Beppu, Japón, se realiza

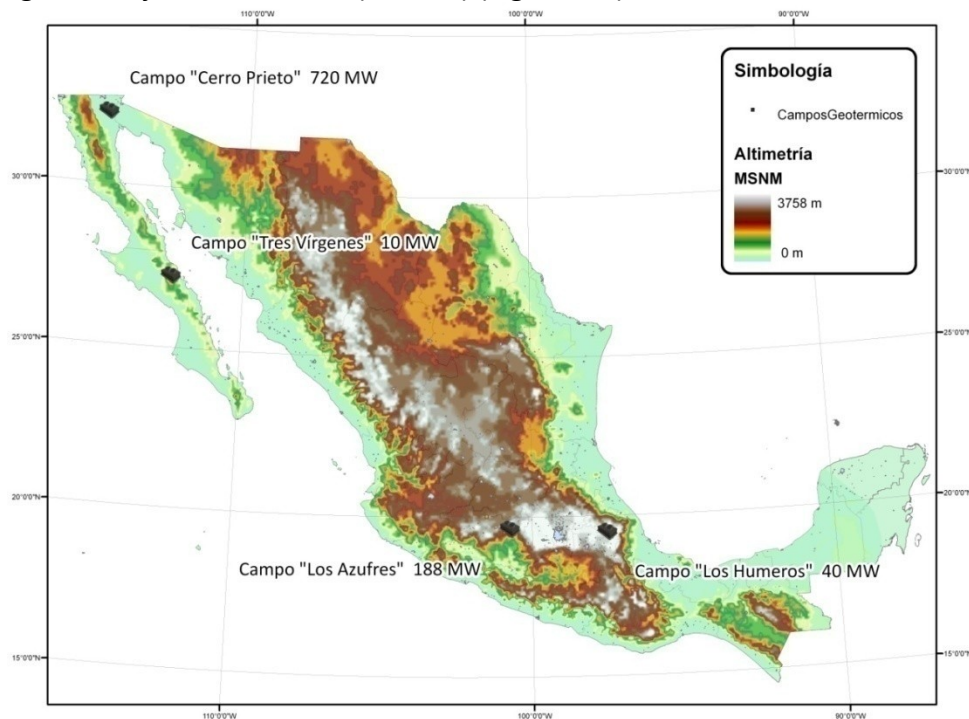
### 3 1 Introducción

la primera perforación enfocada directamente al aprovechamiento de la energía geotérmica, que permitiría producir cantidades significativas de vapor y por lo tanto de energía.

#### 1.2.2 Geotermia en México

En México, en el año 1958, se inauguró la primer planta geotérmica en la zona de Pathé, municipio de Acambay, Estado de México, ubicado al centro del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), la cual funcionó como proyecto experimental principalmente, que permitiría posteriormente el desarrollo de uno de los campos geotérmicos más importantes del país y del mundo, el campo Cerro Prieto, en Baja California Norte.

A nivel mundial México ocupa el tercer lugar en aprovechamiento de la energía eléctrica mediante explotación geotérmica, hasta la fecha se tiene aproximadamente 950 MW de capacidad instalada, que representa el 2.3 % de la capacidad instalada en el mundo. La geotermia produce entre 5619 y 6728 GWh anuales, que contribuyen con el 5 % de la generación total del país, debido a los altos factores de planta en los campos; la generación de energía se encuentra repartida en 4 campos principales, Cerro Prieto, Baja California Norte (720 MW), Los Azufres, Michoacán (188 MW), Los Humeros, Puebla (40 MW) y finalmente, Las Tres Vírgenes, Baja California Sur (10 MW) (Figura 1.1).



**Figura 1.1. Localización de los campos geotérmicos principales en México y la cantidad de energía generada en megawatts (MW).**

### 1.2.3 Campos geotérmicos

Un campo geotérmico característico está compuesto por tres elementos principales, una fuente de calor, un acuífero y una capa o roca sello, que impida a los fluidos termales disiparse en la corteza.

Los procesos necesarios para llevar a cabo la extracción de los fluidos contenidos y almacenados, se realiza a través de un proceso cíclico; en la Figura 1.2 se presenta un sistema de extracción típico, en el cual intervienen los procesos y sistemas siguientes:

1. **Sistema de producción:** los fluidos (agua caliente o vapor) pueden fluir naturalmente a superficie, por bombeo o por impulsos de flujos de agua y de vapor (*flashing*). El método a elegir depende del análisis económico y su rentabilidad.
2. **Sistema de generación:** los fluidos ya en superficie, realizan una transferencia de energía calorífica y mecánica a los generadores eléctricos, para después atravesar las torres de enfriamiento.
3. **Sistema de inyección:** el agua después de pasar por las torres de enfriamiento regresa al yacimiento por conducto de un pozo inyector, lo que permite fracturar la formación mejorando la permeabilidad y reabasteciendo el suministro de agua.

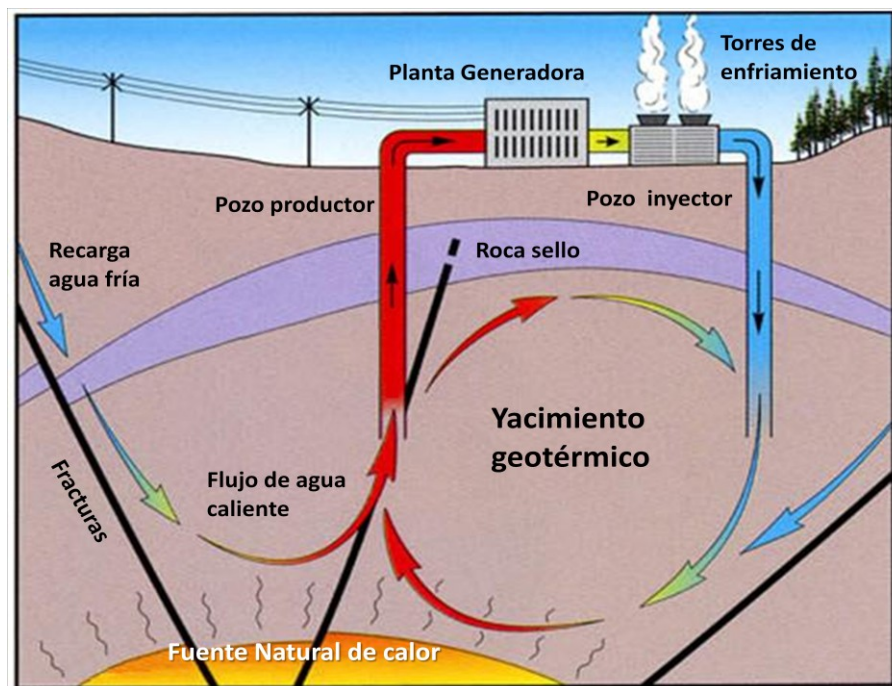


Figura 1.2. Yacimiento geotérmico típico (Modificado del GRC, [http://www.geothermal-energy.org/314,what\\_is\\_geothermal\\_energy.html](http://www.geothermal-energy.org/314,what_is_geothermal_energy.html)).

### 1.2.4 Sismología pasiva

El estudio y monitoreo de la microsismicidad en campos geotérmicos, se ha llevado a cabo en varios lugares del mundo (Lermo y cols., 2007, 2008, 2009; Valdés, 2004; Rutledge y cols., 2002; Rodríguez, 2002; Phillips y cols., 2002; Munguía y Wong, 1993; Segall, 1989; Eberhart-Phillips y cols., 1984; Ponce y Rodríguez, 1977, etc.), estos estudios han propuesto modelos de comportamiento de los yacimientos con base en el análisis de la microsismicidad. Los sismos se presentan como una respuesta al cambio en el estado de esfuerzos de la roca sello o encajonante. Los campos geotérmicos son manifestaciones naturales y artificiales, generadas por el movimiento de los fluidos contenidos y calentados por la energía calorífica interna de la tierra; al experimentar alteraciones buscan salida hacia sistemas superiores de menor densidad de roca (diferencia de densidad), por conducto de fracturas naturales ó inducidas; por lo tanto, ubicar las zonas de fracturamiento que constituye un gran porcentaje de la permeabilidad y tiene gran implicación en el desarrollo y rentabilidad de los yacimientos, debido a que presentan los lugares óptimos para la ubicación de los pozos.

Mediante el monitoreo sísmico es posible detectar y observar los cambios producidos en las estructuras sismogénicas principales, así como las características geométricas y variación de las propiedades físicas en el tiempo. En resumen, el monitoreo sísmico es una herramienta poderosa para prevenir daños, monitorear los cambios en la roca producto de las operaciones de explotación en el yacimiento y el movimiento de fluidos.

Es importante señalar que los estudios de sismicidad previos a la etapa de explotación, en los campos geotérmicos de México son mínimos; por lo general se realizan en la etapa de explotación; los primeros estudios fueron llevados a cabo por Ponce y Rodríguez (1977), logrando observar una actividad sísmica local mínima relacionada directamente al campo. Posteriormente Rodríguez (2000), continúa con los estudios de sismicidad, pero ahora en el campo Tres Vírgenes, logrando observar numerosa actividad y asociar los eventos a una falla regional, La Virgen.

### 1.2.5 Relación con las operaciones en el campo

Dentro de las diferentes operaciones que se realizan en la explotación y generación de energía en un yacimiento geotérmico, la reinyección de agua mediante pozos inyectoros y la extracción de vapor a través de los pozos productores, constituyen las operaciones que

de forma continua se encuentran interactuando con el yacimiento; por lo tanto, derivado de la interacción y el movimiento de los fluidos, se inducen una gran cantidad de esfuerzos que posteriormente se manifiestan en las estructuras sismogénicas.

### 1.3 Metodología

#### 1.3.1 Análisis y procesamiento de los datos sísmicos

En el análisis de sismicidad se enumeran los diferentes procesos y conceptos que intervienen en localización espacial de las diferentes señales.

##### 1.3.1.1 Adquisición, formato y manejo de datos

El procedimiento de adquisición, formato y manejo de los datos, generados a través de las diferentes redes sísmicas en el estudio, consiste básica y generalmente por los pasos siguientes:

- 1 Descarga de información:** se acudió a cada estación de monitoreo para la descarga de la información con una recurrencia mensual, para evitar la acumulación y sobre escritura de los datos, considerando un posible sobrecupo en la capacidad de memoria en los discos duros de las estaciones.
- 2 Formato:** dependiendo de los diferentes equipos de monitoreo se generan diferentes clases o tipos de archivos, los cuales para facilitar el manejo en el software, se agruparán utilizando un común denominador que serán los archivos de tipo *SEISAN* o binarios, sin embargo también se utilizaron extensiones de tipo *Guralp* o ASCII, los cuales posteriormente se convirtieron en archivos binarios.
- 3 Elaboración de gráficos (tambores):** para lograr una lectura óptima de la información, se toma como base una estación diagnóstico, debido a diferentes razones desde áreas de estudio específicas y zonas de cobertura por la malla sísmica, el ruido ambiental, calidad de la señal, sismógrafos de banda ancha, etc. Finalmente se continúa con la impresión de los archivos en registros de una hora, los cuales pueden ser graficados en forma de un “tambor” de 24 horas para la estación o estaciones seleccionadas.

## 7 1 Introducción

---

- 4 Registros sismos locales, regionales y lejanos:** realizando una revisión de “los tambores” se identifican y clasifican los eventos sísmicos principales de acuerdo a la longitud de tiempo entre los de arribos entre onda P y S, sismos locales, regionales y lejanos, para el estudio se consideran principalmente los registros más cercanos al campo (diferencia entre el arribo de las ondas S menos P menor a cinco segundos), para después correlacionar el evento con las demás estaciones (por lo menos tres de ellas), que posteriormente serán analizados y localizados. En el estudio los sismos regionales y lejanos, no serán analizados por qué no son parte de los objetivos de esta tesis.
- 5 Recolección y construcción de base de datos sísmicos:** para la determinación de los parámetros hipocentrales (tiempo de origen, longitud, latitud, profundidad y magnitud para cada sismo), es necesario ordenar y agrupar todas las señales en un formato común para objeto de el estudio se utilizó el sistema *SEISAN (Seismic Analysis Software)*, ya que han sido identificadas las señales se deben encontrarse en conjunto las tres componentes (dos horizontales y uno vertical) de todas las estaciones que hayan detectado el evento, para finalmente construir la base de datos sísmicos.

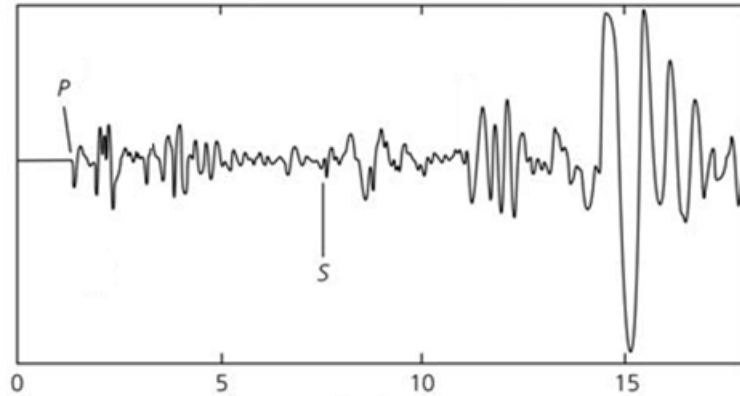
### 1.3.1.2 Determinar el arribo de ondas S, P y longitud de la coda

Es esencial para aproximar la localización de los eventos, determinar los arribos de las diferentes ondas sísmicas; debido a la estructura interna de la tierra, al producirse un evento sísmico, la energía liberada se propaga en forma de ondas; a su paso las ondas sísmicas se encuentran con estructuras múltiples en el trayecto de la fuente y la unidad receptora (Sismógrafo), lo que resulta en un sismograma con diversidad de fases; las fases y ondas principales consideradas en el análisis son las ondas primarias P y las ondas secundarias S (Figura 1.3).

- **Ondas primarias (P):** las ondas P son ondas longitudinales o compresionales, lo cual significa que el suelo se comprime y dilata en forma alternada en la dirección de la propagación, lográndose trasladar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido.

- **Ondas secundarias(S):** son ondas donde el desplazamiento se realiza en forma transversal a la dirección de propagación. Su velocidad es menor que la de las ondas primarias, por lo

tanto el arribo al receptor es posterior a las ondas P; son las ondas que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico; además sólo se trasladan a través de elementos sólidos.



**Figura 1.3. Corte de un sismograma, donde se observan los arribos de las ondas P y S (Havskov y Ottemoller, 2003).**

### 1.3.1.3 Programa de localización

Para dar lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S, es necesario seguir un programa de localización; se manejó un *software* estándar comúnmente utilizado en la sismología, que facilita el procesado de los datos y que permite un rápido desarrollo de los cálculos, mediante algoritmos a través de métodos y modelos matemáticos asistidos por una computadora; además incluye los procesos principales para una ubicación aproximada de los hipocentros, de forma que se reduzca en lo mayor posible el error de los programas o *softwares* que se han desarrollado, se utilizó el conjunto de programas y subprogramas, agrupados en una plataforma de nombre *SEISAN (Seismic Analysis Software, versión 8.0)*; desarrollado en el 2003 por Havskov y Ottemoller, en la Universidad de Bergen, Noruega.

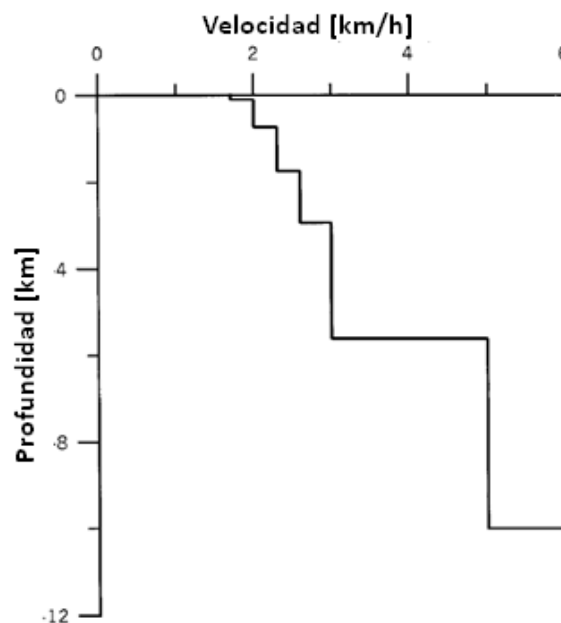
Para emplear el programa es necesario contar con una serie de datos de entrada:

1. Estaciones Nombre de la estación, coordenadas geográficas (latitud y longitud), elevación, etc.
2. Registro de los tiempos de arribo de las ondas P ( $T_p$ ), S ( $T_s$ ), la duración total del sismo, una relación de velocidad ( $V_p/V_s$ )
3. Modelo de velocidad
4. Ecuación para el cálculo de la magnitud de duración

## 9 1 Introducción

### 1.3.1.4 Modelo de velocidades

La velocidad de propagación en un evento sísmico se traduce como la rapidez de un punto en sacudirse; por lo tanto mediante un modelo de velocidades se generaliza el tiempo en una zona, obteniendo un valor representativo de la estructura utilizando capas o estratos con diferentes velocidades sísmicas de propagación, la variación en la velocidad depende principalmente del tipo de roca y en menor cantidad de los fluidos contenidos en ella, por lo tanto conocer la geología estratigráfica de la región, resulta de gran importancia para lograr una localización más exacta. En la Figura 1.4 se presenta un ejemplo para el modelo de velocidades, donde de acuerdo a cada estrato se otorga una velocidad.



**Figura 1.4 Modelo de velocidades utilizado en el campo geotérmico de Cerro Prieto (Rebollar y cols., 2003).**

### 1.3.1.5 Velocidad de desplazamiento de las ondas sísmicas

Para hacer uso del sistema *SEISAN* es necesario además de ingresar los datos de entrada, establecer una relación de velocidades  $V_p/V_s$ . Efectuando una lectura general de los tiempos  $T_s$  y  $T_p$ , en las diversas señales se observó que se generaron con una precisión de 0.01 segundos, debido a la calidad de la información. La relación puede obtenerse a través de varios métodos; en esta tesis se han utilizado las curvas de Wadatti realizadas año por año, un método desarrollado y comprobado en estudios previos, finalmente se encontró un valor promedio de  $V_p/V_s = 1.76$  (Antayhua, 2007).



### 1.3.1.6 Ecuación para el cálculo de la magnitud de duración

Inicialmente la magnitud de un sismo se define como un número que caracteriza el tamaño relativo de un terremoto; la magnitud se basa en la medición del movimiento máximo registrado por un sismógrafo.

Dentro de las escalas de magnitudes comúnmente empleadas se encuentran la de magnitud local también conocida como Magnitud Richter, Magnitud de Ondas Superficiales, Magnitud de Ondas de Cuerpo, Magnitud de Momento, Magnitud de Energía, Magnitud de Duración, Magnitud de Coda, etc.; en el estudio únicamente se utilizará la magnitud local y de duración:

- **Magnitud Local (*MI*):** en 1935, Richter definió la magnitud para medir un sismo basado en un registro instrumental para sismos locales en California, considerando un radio de aproximadamente 600 km; se determina a partir de la amplitud máxima registrada por un sismógrafo con constantes específicas (período de 0.8 segundos, amplificación estática de 2800 y un factor de amortiguamiento = 0.8), ubicado a 100 kilómetros de la fuente sísmica. Para su determinación se utiliza la expresión siguiente:

$$MI = 1 \log A - \log B$$

donde *A* es la amplitud máxima de la traza registrada y *B* la amplitud máxima que sería producida por un sismo patrón, siendo éste aquel que produciría una deflexión de 0.001 mm en un sismógrafo ubicado a 100 km del epicentro. Ya que la escala de magnitud es logarítmica, el incremento en una unidad de magnitud significa un aumento en diez veces de la amplitud de las ondas en el sismograma.

- **Magnitud de duración (*Md*):** esta magnitud es una variación del concepto de magnitud local que se emplea en algunas redes. Su nombre proviene del hecho que es calculada con base a la duración del registro de la señal sísmica. Su expresión es la siguiente:

$$Md = a \log(X) - b + c Y$$

donde *X* es la duración del registro de la señal sísmica en segundos, *Y* la distancia epicentral y *a*, *b*, *c* son coeficientes ajustados para que *Md* corresponda a *MI*.

## 11 1 Introducción

---

La escala Richter no debe confundirse con lo que sucede con la energía sísmica liberada, en la que un incremento en magnitud equivale a un aumento de  $Md$ .

Es importante que cada región o campo geotérmico tuviera una ecuación propia para calcular su magnitud de duración, ya que esta varía de acuerdo a las características de los sedimentos o rocas, sus espesores y las estructuras presentes; sin embargo se requeriría un mayor número de sismos para lograr este objetivo. Aunque con sismos mayores se estiman magnitudes de momento ( $Mw$ ). Inicialmente, se tomará la relación siguiente propuesta por Havskov y Macías (1983), la cual fue elaborada para la zona volcánica del eje Neovolcánico:

$$Md = -1.59 + 2.4 \text{ Log}_{10}(T) + 0.00046D$$

donde  $Md$  es la magnitud de duración en grados corregida a partir de la ecuación propuesta por Lee y cols., 1973,  $T$  es la duración total del sismo en segundos y  $D$  la distancia epicentral en kilómetros.

### 1.3.1.7 Localización hipocentral

La subrutina del sistema SEISAN, utilizada para la localización es *Hypocenter* (Havskov y Ottemoller, 2003). La subrutina está basada en los algoritmos de solución para determinar la localización, utilizados durante los últimos 30 años en el programa HYPO71.

### 1.3.1.8 Distribución en superficie y profundidad de los sismos seleccionados

Para lograr observar los hipocentros en un sistema de referencia, se utilizar la subrutina del sistema SEISAN llamada *epimap*; esta subrutina permite construir graficas y localizar los hipocentros en un mapa de referencia. La incorporación de datos en la subrutina se considera opcional; sin embargo resulta de gran utilidad introducir la mayor cantidad de información en el sistema (curvas de nivel, hipocentros, intensidad de microsismos, estaciones, pozos, etc.).

Complementario a la subrutina *epimap*, se utilizó software especializado en el manejo de datos SIG (Sistema de información Geográfica) de nombre *ArcGis*, paquetería primordial en la utilización de datos geográficos y en su conjunto las diferentes herramientas incluidas en los subprogramas *Arc Catalog*, *Arc Scene*, etc.

## 2 Análisis de los campo geotérmicos

### 2.1 Campo Los Humeros

#### 2.1.1 Antecedentes

El campo geotérmico de Los Humeros es el tercer campo geotérmico en importancia del país, después de los campos Cerro Prieto y Los Azufres; se localiza en el estado de Puebla cerca de los límites con Veracruz. En el año de 1968, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) efectuó los primeros estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos. En el año de 1982 se perforó el primer pozo profundo con el objeto de confirmar los resultados de los estudios. En 1990 se inició la explotación comercial del yacimiento con la instalación de la primera unidad de 5 MWe. A la fecha se han perforado más de 40 pozos y se cuenta con una capacidad instalada de 42 MW, distribuidos en 7 plantas generadoras de 6 MW cada una (Quijano Negrín, 2009).

El proceso de explotación en el campo consiste en 40 pozos, cuyas profundidades varían entre 1450 a 3250 m. De ellos, 18 son productores (H-1, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 15, 16, 17, 19, 20, 30, 31, 32, 35, 36 y 37), cuatro se utilizan o se han utilizado como inyectores (H-13, H-29, H-38 y H-40); los demás pozos son exploratorios, de estudio o de monitoreo. La producción promedio de vapor en la actualidad es de 510 toneladas por hora (t/h) y la de agua de 92 t/h, a condiciones de presión 8 bar. La zona de alimentación de los pozos, es decir la tubería ranurada, se encuentra en promedio a un intervalo de profundidad en el rango comprendido entre los 1340 a los 1873 m.

El monitoreo sísmico en el campo de Los Humeros inició a partir del sismo del 25 noviembre de 1994 ( $M_d=4.6$ ), el cual ocasionó daños considerables en su infraestructura (Lermo y cols., 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 estudio presente se utilizó la información sísmica registrada durante el periodo 1997-2008 proveniente de estas dos redes sísmicas, a fin de analizar la distribución de la sismicidad y la relación de los sismos registrados en las estaciones permanentes (S05, S06) con los pozos y la tectónica local.

### 2.1.2 Geología y tectónica

El campo geotérmico de Los Humeros se encuentra localizado en el extremo oriental del Cinturón Volcánico Mexicano; se ubica dentro de una caldera de origen volcánico llamada Los Humeros; empezó su formación hace medio millón de años. Posteriormente, hace unos 100 mil años se formó dentro de ella la caldera de Los Potreros. Las últimas erupciones volcánicas ocurrieron hace unos veinte mil años (Negrín, 1982).

La geología del campo geotérmico de Los Humeros ha sido descrita por diversos autores Pérez-Reynoso, 1978; Yáñez-García y cols., 1979; 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 (m.a.) y está constituida por derrames de andesita de hornablenda, cubiertos parcialmente por derrames de andesitas de augita que procederían de los volcanes Cofre de Perote y Pico de Orizaba (5 m.a.).

Tectónicamente, el CGLH presenta tres estructuras caldéricas, Los Humeros, Los Potreros y el Xalapasco, formadas en los diferentes eventos volcánicos ocurridos en el campo. Los 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 (Antigua, La Cuesta, Los Humeros y Loma Blanca), NE-SW (Pamela, Morelia, Parajes) y E-W (Las Papas). La Falla Los Humeros es la única que puede observarse 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. 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 campo permitió la identificación de nueve 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 y cols., 2000). La Figura 2.1.1 muestra la litología del campo y se observan dos cortes de perfil N-S y O-E, además la localización de los pozos operativos principales.

El proceso de reinyección de la salmuera separada, se lleva a cabo mediante los pozos inyectoros, los pozos principales son el H-29, y H-38, y se ubican en la parte centro-norte del campo, inyectando un promedio de 90 a 100 t/h.

### 2.1.3 Estudios sismológicos

Los estudios de sismicidad antes de la explotación del campo geotérmico de Los Humeros fueron mínimos (Ponce y Rodríguez, 1977), los cuales lograron observar una actividad sísmica local mínima relacionada al campo, los estudios posteriores (Lermo y cols., 1999; Lermo y cols., 2001, Lermo y cols., 2002; Lermo y cols., 2005), se realizaron en plena explotación y permitió observar mayor actividad sísmica.

Desde 1994 se cuenta con información sísmica continua, debido a la ocurrencia de un sismo el 25 de noviembre de ese año a las 18:52 (hora GMT) a una profundidad de 2.0 km, que ocasionó algunos daños en la infraestructura de CFE (Figura 2.1.2, Lermo y cols., 1999); con este antecedente CFE instaló una Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP), compuesta por seis sismógrafos digitales triaxiales (S01, S02, S03, S04, S05, S06). Más tarde, con el objeto de mejorar las localizaciones se realizaron campañas de monitoreo sísmico; se instalaron estaciones temporales (PNCF, PSCF, CLCF, HUCF, T07, T08, T09) alrededor del campo geotérmico (Lermo y cols., 2001, 2002).

15 2.1 Campo Los Humeros

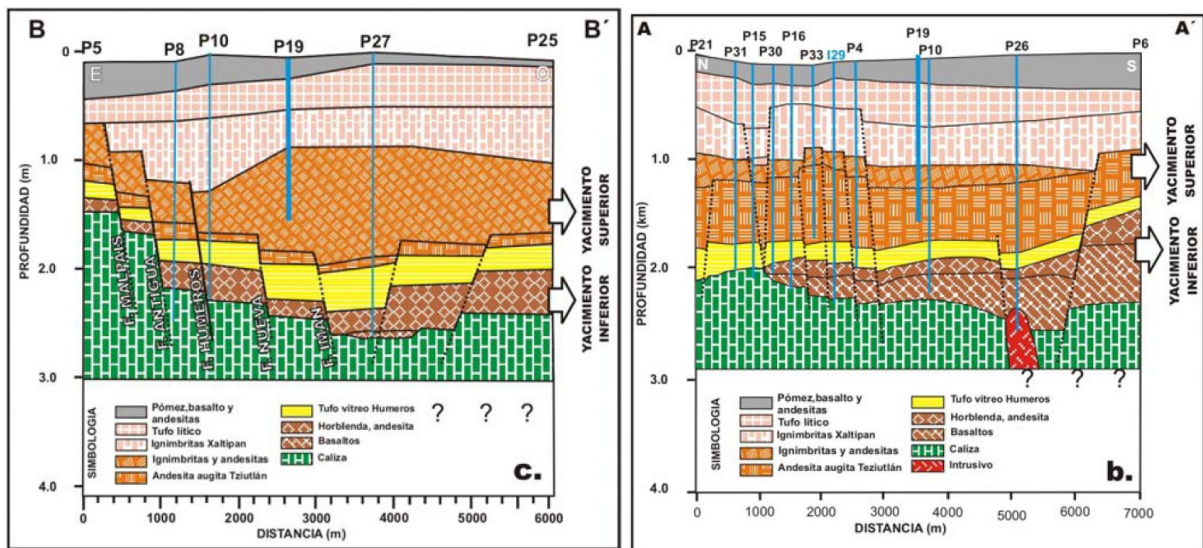
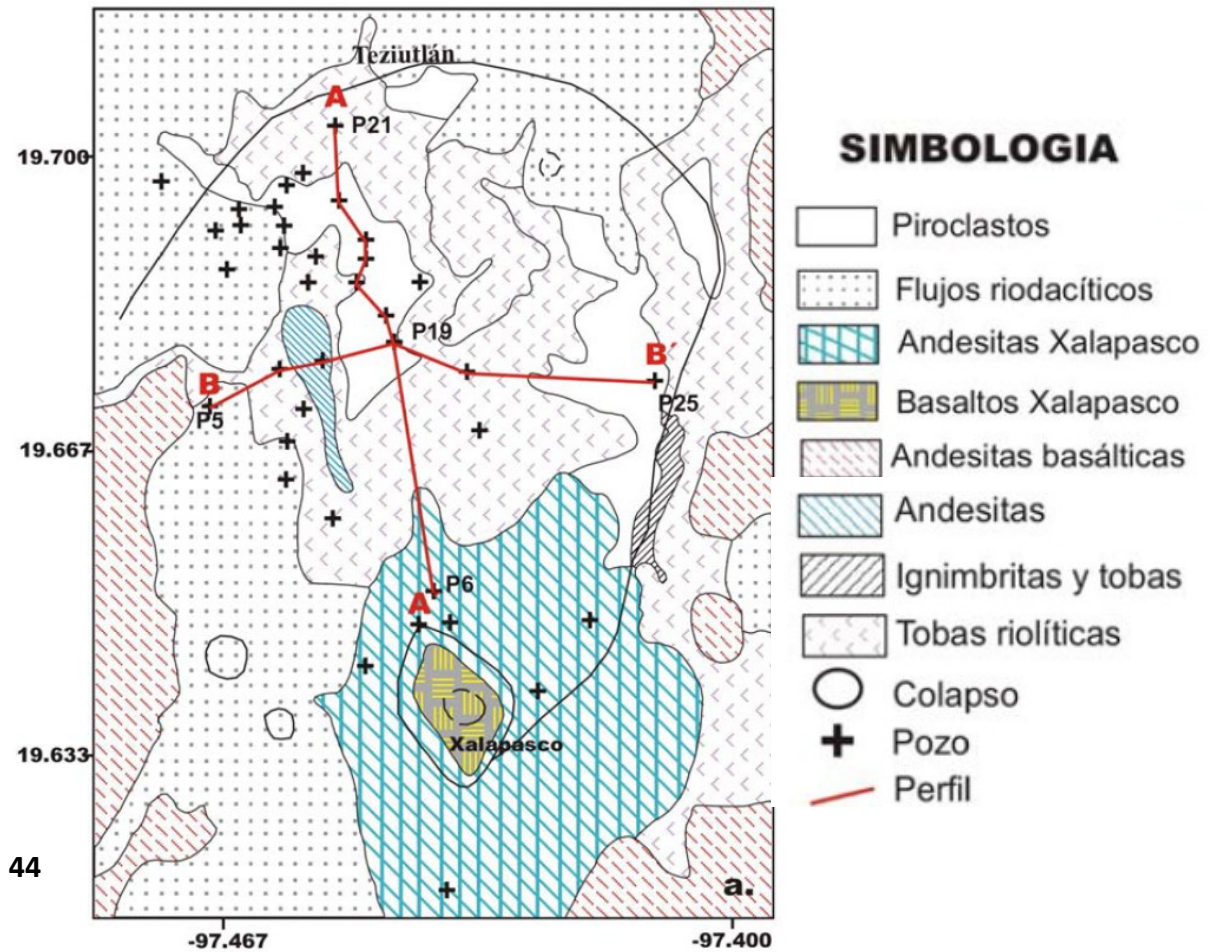
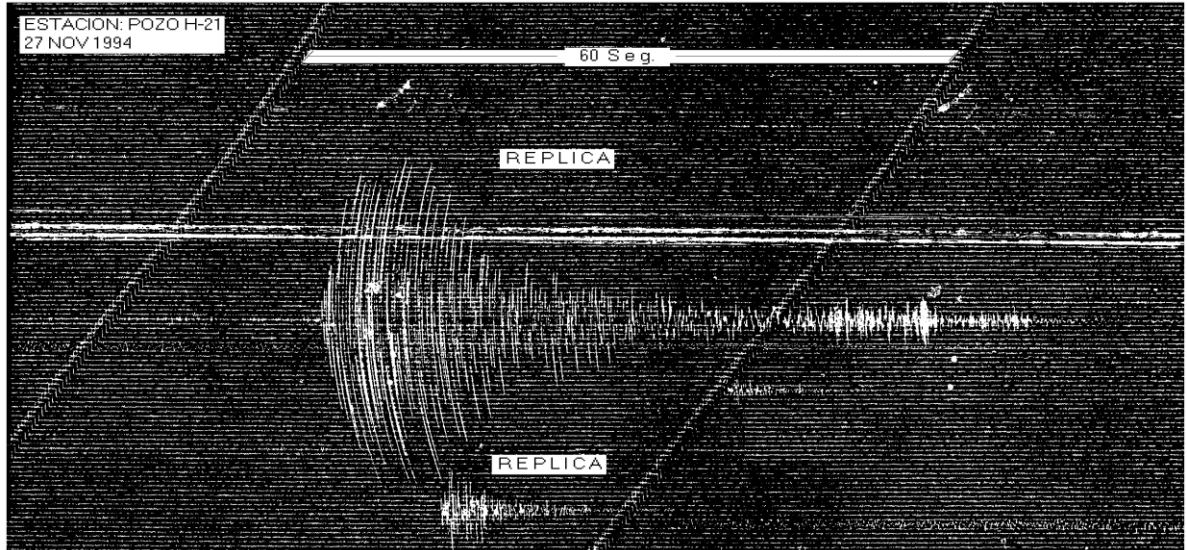


Figura 2.1.1. Geología superficial y del subsuelo del campo geotérmico Los Humeros. a) Productos volcánicos principales depositados en el campo b) y c) perfiles estratigráficos en las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste, de acuerdo a la Figura 2.1.1.a (Antayhua 2007).



**Figura 2.1.2. Sismograma de la estación Pozo H-21 en el campo Los Humeros. Muestra dos réplicas del sismo del 25 de Noviembre de 1994 ( $M_w = 4.6$ ); las dos réplicas fueron registradas el 27 de Noviembre de 1994 (Lermo y cols., 1999).**

Los estudios realizados 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, en los alrededores de los pozos inyectores I29 (H-29) e I38 (H-38), alcanzando profundidades de hasta 4.0 km. Pero a partir de febrero de 1999 del mismo año, 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 y cols., (2002), mostró concordancia con las características estructurales de la falla Los Humeros.

Durante los años 2005 y 2006 se realizaron nuevos proyectos con el objetivo de redistribuir las estaciones sísmicas permanentes e instalar un nuevo sistema de telemetría. Con estos cambios se logró localizar un total de 51 sismos locales en el periodo de Diciembre 2005 a Octubre 2006, los cuales no sobrepasan los 5 km de profundidad, y sus magnitud son del orden de 0.9 a 1.8 Md. Del total de estos sismos se seleccionaron 35, los cuales presentan

## **17 2.1 Campo Los Humeros**

---

una mayor concentración sobre la Falla Antigua, en la zona de los pozos de mayor producción P09, P35 y P37; mientras que un segundo grupo de menor cantidad, se concentran alrededor de los pozos inyectoros I29 e I38 y probablemente sobre la traza de la falla Los Humeros (Lermo y cols., 2005 y 2006).

Durante el año 2007 (Lermo y cols., 2007), se localizaron un total de 39 sismos locales con tres o más estaciones en el periodo de Marzo a Octubre del 2007, los cuales no sobrepasan los 4 km de profundidad, y sus magnitud son del orden de 1.0 a 3.0 Md. Nuevamente, durante el 2007 se tuvo una distribución espacial muy semejante al del año del 2006, ya que la mayor concentración de sismos locales se encuentran sobre los pozos de mayor producción P09, P35, P37 y P16. Sin embargo, en esta ocasión se presento una reactivación de la actividad sísmica en la zona sur del campo geotérmico. Con base en lo anterior, se puede concluir que la Falla La Cuesta, en la zona de los pozos de producción principal, presenta una actividad más numerosa que la Falla Los Humeros.



## 2.1.4 Monitoreo sísmico

### 2.1.4.1 Estaciones sismológicas

La red de estaciones sismológicas que monitorean de forma permanente y temporal en el campo geotérmico cambian continuamente durante los diferentes periodos, hasta el año 2007 se encontraba integrada por seis sismógrafos de periodo corto y tres de banda ancha; para el último periodo de estudio en el 2008, se instaló por parte del Instituto de Ingeniería, un nuevo sismógrafo digital de banda ancha: *Guralp* modelo CMG-6TD (Figura. 2.1.3), marcando el inicio de la modernización y actualización de los instrumentos sísmicos de la red de monitoreo, debido principalmente a los sismógrafos digitales de periodo corto, los cuales tienen más de 10 años en operación y presentan problemas inherentes al tiempo de uso.

La red de monitoreo que se consideró para la localización y restricción en el estudio presente comprende 12 estaciones; en la Tabla 2.1.1 se describen las características principales (Nombre, código, registro y tipo de sensor), así como las coordenadas geográficas de localización para cada una de ellas.



Figura 2.1.3. Elementos que integran una de las estaciones de monitoreo en el campo Los Humeros. Sismómetro de 3 componentes (Z, N-S y E-O): *Guralp* modelo CMG-6TD.

## 19 2.1 Campo Los Humeros

Tabla 2.1.1. Características principales de las estaciones sísmicas de la red sísmica del campo Los Humeros (Lermo y cols., 2009).

Estación	Descripción	Código	Registrador Sensor	Latitud S (Grados, minutos decimales)	Longitud W (Grados, minutos decimales)	Altura (Metros)
Permanentes	Acelerógrafo Altus K2	Solotepec S01	Kinematics tipo Ranger SS-1 de periodo corto (1 segundo)	19.721	-97.445	2975
	Acelerógrafo Altus K2	Coamilacas S02		19.646	-97.402	2925
	Acelerógrafo Altus K2	El Jaral S03		19.633	-97.46	3000
	Acelerógrafo Altus K2	Los Coyotes S04		19.69	-97.488	2775
	Acelerógrafo Altus K2	Loma Blanca S05		19.684	-97.456	2800
	Acelerógrafo Altus K2	Las Papas S06		19.661	-97.44	2900
	Acelerógrafo Altus K2	San Antonio Repetidor		19.718	-97.42	3110
Temporales	Acelerógrafo Altus K2	Campamento Central	Reftek 72A-08 de 24 bits Guralp CMG-40T	19.63	-97.412	2970
	Reftek-Guralp Banda ancha	CG HUCF		19.681	-97.458	2840
	Reftek-Guralp Banda ancha	CG CLCF		19.687	-97.452	2885
	Reftek-Guralp Banda ancha	CG PSCF		19.686	-97.46	2754
	Reftek-Guralp Banda ancha	CG PNCF		19.693	-97.454	2435

### 2.1.5 Análisis de la actividad sísmica

En la metodología para el análisis sísmico en el campo, no se realizaron cambios mayores en el proceso, solo se ajustó la ecuación de la magnitud de duración, y el modelo de velocidades correspondiente a la geología estratigrafía del campo.

#### 2.1.5.1 Modelo de Velocidades

Entre los diferentes métodos aplicados para conocer el modelo de velocidades en el campo, el más adecuado fue el obtenido por Lermo y cols., 2001, a partir de cuatro perfiles de reflexión sísmica realizado por la COMESA (Compañía Mexicana de Exploraciones S.A. de C.V., 1998) (Tabla 2.1.2).

**Tabla 2.1.2 Modelo de velocidades para el campo Los Humeros (Lermo y cols., 2001).**

<b>Velocidad Onda P (Km/s)</b>	<b>Profundidad (km)</b>
<b>1.24</b>	<b>0.00</b>
<b>1.94</b>	<b>0.24</b>
<b>2.85</b>	<b>0.65</b>
<b>3.54</b>	<b>1.25</b>
<b>3.69</b>	<b>1.79</b>
<b>3.90</b>	<b>1.93</b>
<b>4.14</b>	<b>2.13</b>
<b>5.18</b>	<b>2.37</b>
<b>6.00</b>	<b>30.00</b>

#### 2.1.5.2 Localización Hipocentral

Para obtener la mejor localización posible, es necesario contar con la información más detallada y confiable de los sismos; por lo tanto es importante considerar la fuente principal de información (sismógrafo) del campo, en su defecto la estación de diagnostico H05 es un sismógrafo de banda ancha y permite observar con mayor detalle las señales; como muestra

## **21 2.1 Campo Los Humeros**

---

de su capacidad y potencial, en tan solo en 3 meses (agosto a octubre del 2008), se lograron reconocer alrededor de 72 sismo locales.

Durante los diversos periodos de estudio en el campo, surgen restricciones al momento de la selección de eventos, debido a su gran cantidad registrada; sin embargo debido a la baja magnitud la señal se atenúa antes de llegar a las estaciones más distantes, y a causa de la necesidad de identificar las fases surgen problemas para realizar las lecturas, desde arribos de onda hasta la capacidad de observar el mismo evento en por lo menos tres estaciones. Para el campo Los Humeros los eventos se procesaron con lecturas en al menos tres estaciones, para análisis más concretos se utilizaron los eventos con menor incertidumbre observados en mínimo cinco estaciones.

Los datos hipocentrales de los 237 sismos seleccionados, están enlistados en la Tabla A1 del Anexo A, donde se logra observar el tiempo de ocurrencia, las coordenadas geográficas de localización (latitud y longitud), así como magnitud, RMS y el número de fases observadas.

Los datos que obtenidos presentan las características siguientes:

1. Los errores de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) son mayores a los 3 km para los sismos localizados con 3 estaciones; mientras que para los localizados con 4 o más estaciones los errores fueron menores a 3 km.
2. Los 237 sismos localizados se encuentran en una profundidad de 0.8 hasta los 5.7 km.
3. La magnitud de los sismos es pequeña y se encuentran en un intervalo de 0.6 a 3.2 Md.
4. La mayor parte de los sismos se localizan en la parte norte del campo geotérmico.

**2.1.5.3 Distribución en superficie y en profundidad de los sismos seleccionados**

En la Figura 2.1.4 se muestra la distribución en superficie de los 237 sismos mejor localizados durante el periodo de diciembre 1997 a octubre 2008, en el Campo Geotérmico de Los Humeros, cuyos parámetros hipocentrales se encuentran en la Tabla A2 del Anexo A. Tal como se puede observar, los sismos locales se han graficado con círculos verdes, líneas amarillas continuas la traza de la carretera asfaltada y con triángulos amarillos las estaciones sismológicas permanentes; con triángulos naranjas se muestran los pozos en producción y con triángulos azules los pozos inyectoros.

En el análisis cronológico del último periodo de estudio (Figura 2.1.5), la parte inferior la distribución de sismos correspondiente al último periodo de estudio (2007-2008), se observan los eventos en un radio de 1 km con respecto a la zona de mayor temperatura y de inyección, donde probablemente de acuerdo a los modelos hidrológicos, debido al sistema de fallas y deformaciones mismas en el yacimiento (distribución de permeabilidad, porosidad, temperatura, direcciones de flujo, etc.), el agua de inyección o de flujo meteórico, alcanza puntos de conducción entre las fallas, de tal forma que aumenta la permeabilidad de proporcionalmente e incrementa el alcance longitudinal del flujo de fluidos, arribando a intervalos diferentes, produciendo cambios de esfuerzos y sismicidad donde no se había presentado.

Regresando con los sismos locales, se observa que la mayor concentración se distribuye sobre las trazas de las fallas La Cuesta, Los Humeros, Loma Blanca (falla Nueva) y Las Papas, manifestando su movimiento y actividad; sin embargo, la gran acumulación de la sismicidad se encuentra entre las fallas Loma Blanca, Los Humeros, La Cuesta y los pozos productores P03, P35 y P09. Durante los diferentes periodos de estudio se puede observar actividad sísmica cercana a los pozos inyectoros desde los primeros estudios en el año 1997 hasta decaer la cantidad de eventos asociados en el 2008.

23 2.1 Campo Los Humeros

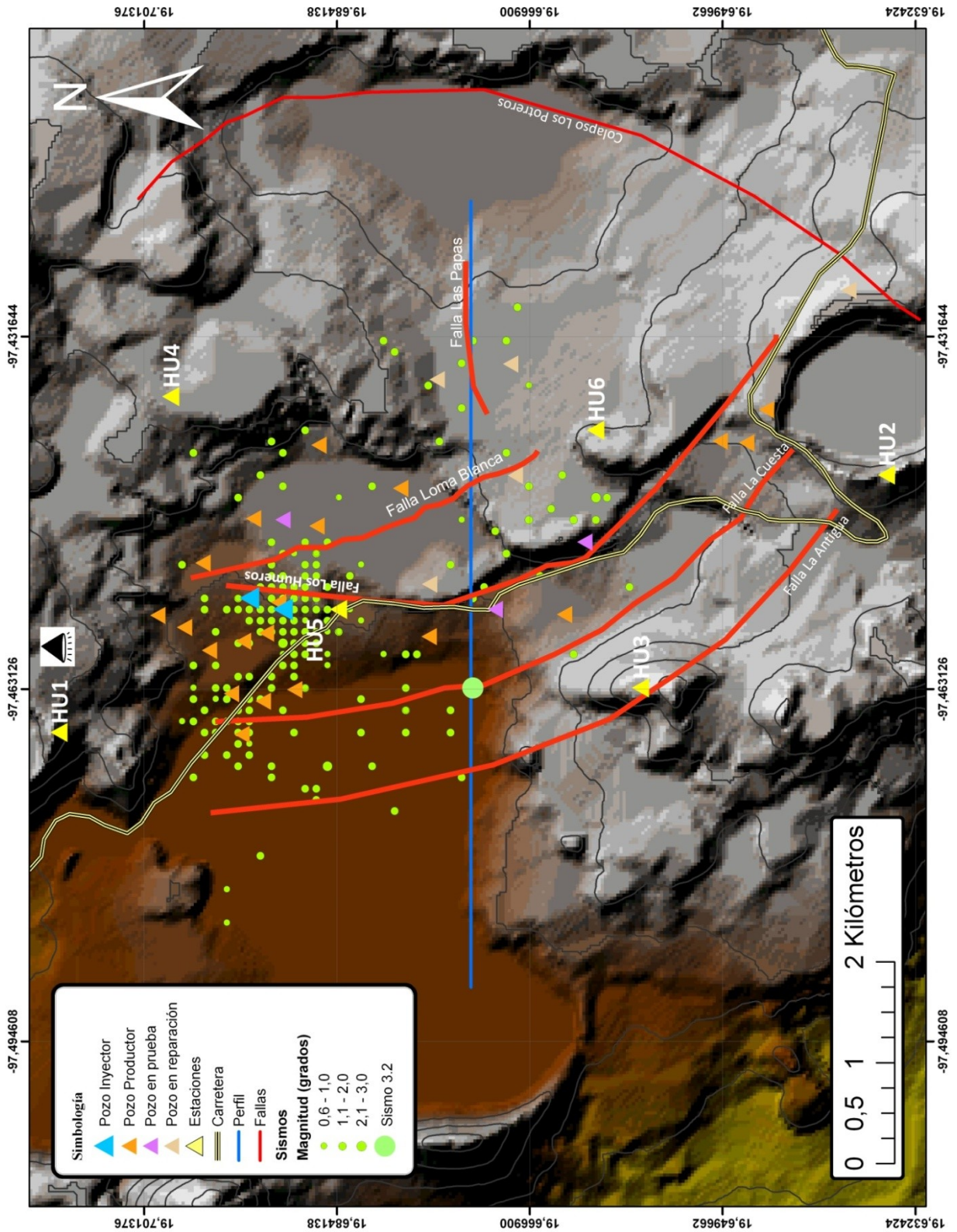


Figura 2.1.4. Mapa geomorfológico con la distribución espacial, 1997-2008.



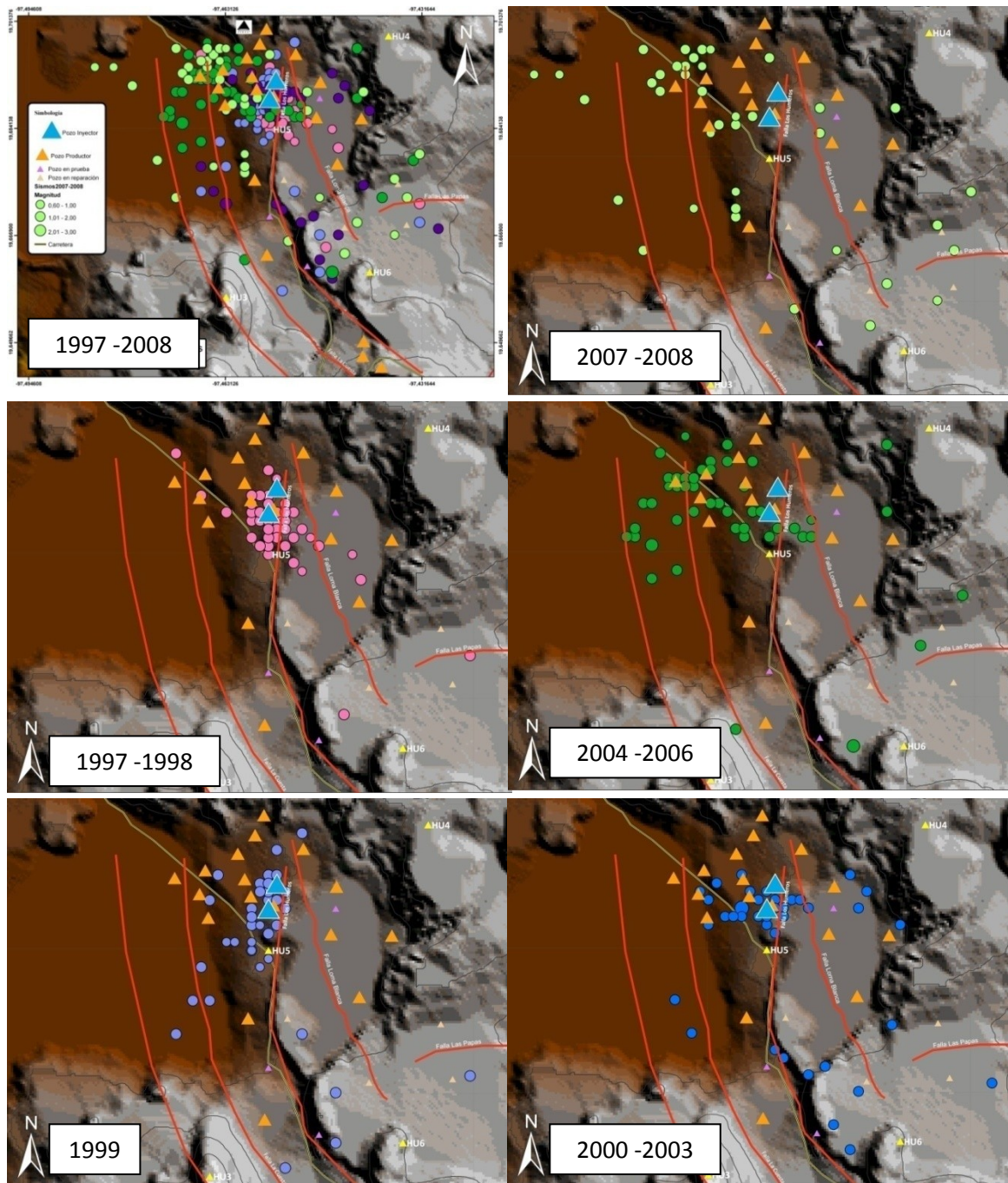


Figura 2.1.5. Distribución de la sismicidad durante los periodos de estudio principales; se concentran los sismos en mayor porcentaje cercanos a los pozos inyectoros.

## **25 2.1 Campo Los Humeros**

---

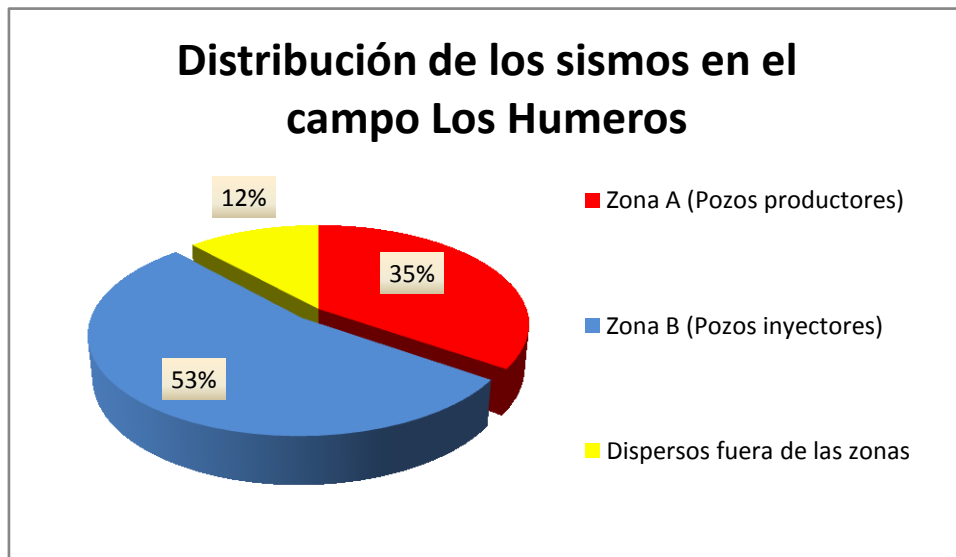
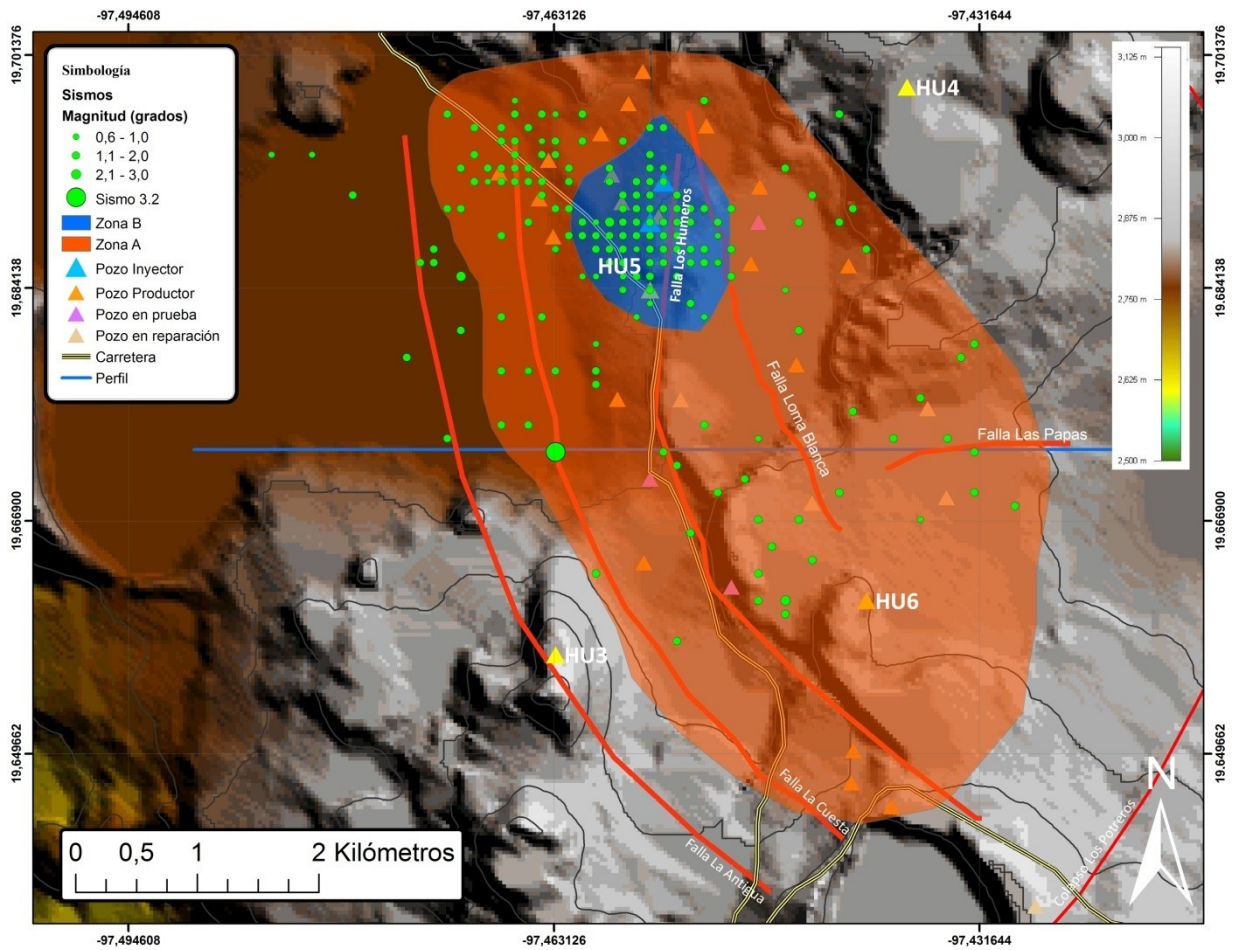
A partir de la distribución en superficie se trazó el perfil con dirección E-O (línea discontinua azul, Figura 2.1.9), de acuerdo al perfil sísmico se logran observar las diferentes acumulaciones (zonas sísmicas) en el campo, el mayor número de sismos se encuentra concentrado en el norte del campo, en posiciones cercanas a los pozos inyectoros, aproximadamente 121 sismos de un total de 237, lo que representa el 51 %, dentro de un intervalo de 2000 a 2700 metros de profundidad.

En el intervalo de los 3000 a 5000 metros (zona de mayor profundidad), se localizan alrededor de 40 eventos, dispersos por debajo del intervalo disparado de producción más importante y 28 relacionados a la Falla La Antigua, los eventos más profundos sugieren la posible longitud alcanzada por el fallamiento, conforme a la correlación y ubicación de los sismos se han proyectado líneas para resaltar la forma, rumbo y echado de las fallas activas existentes en el campo anteriormente mencionadas.

Por otro lado 38 sismos se encuentran dispersos en la zona sur del campo y asociados en una profundidad menor a 1000 metros, 9 eventos se relacionan a la Falla Las Papas y se encuentran dispersos en un intervalo desde 5000 metros hasta cercano 150 metros bajo la superficie, un número reducido de eventos se encuentran dispersos donde quizás se localice la extensión total de la Falla Las Papas y la zona de alimentación del yacimiento, ambas ubicadas en la zona geológica de las calizas.

El error en la localización se mantiene constante en el campo, dentro de los parámetros que permiten una baja incertidumbre en el análisis, se logran observar las diferentes elipses de error en Figura 2.1.9.





Figuras 2.1.6 y 2.1.7. Zonificación del campo Los Humeros; vista en planta en figura superior y porcentaje de distribución para los 237 sismos en las diferentes zonas.

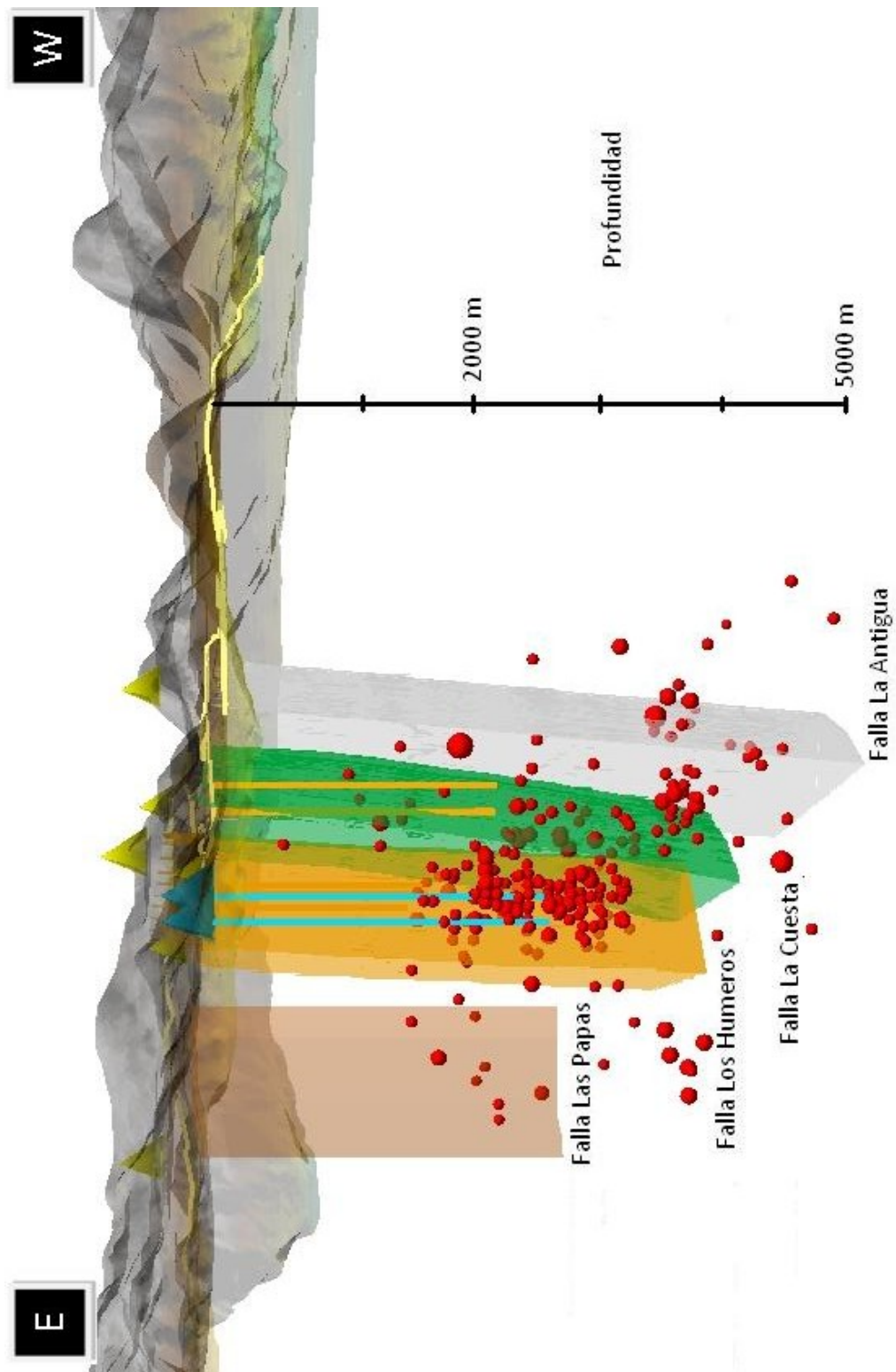


Figura 2.1.8. Perfil sísmico E-O del campo Los Humeros. La sismicidad en una escala de incremento gradual de magnitud (esferas rojas), pozos inyectores (líneas azules) y productores (líneas naranjas), proyección de las fallas: Los Humeros (polígono naranja), La Cuesta (polígono verde), La Antigua (polígono gris) y Las Papas (polígono rojo).

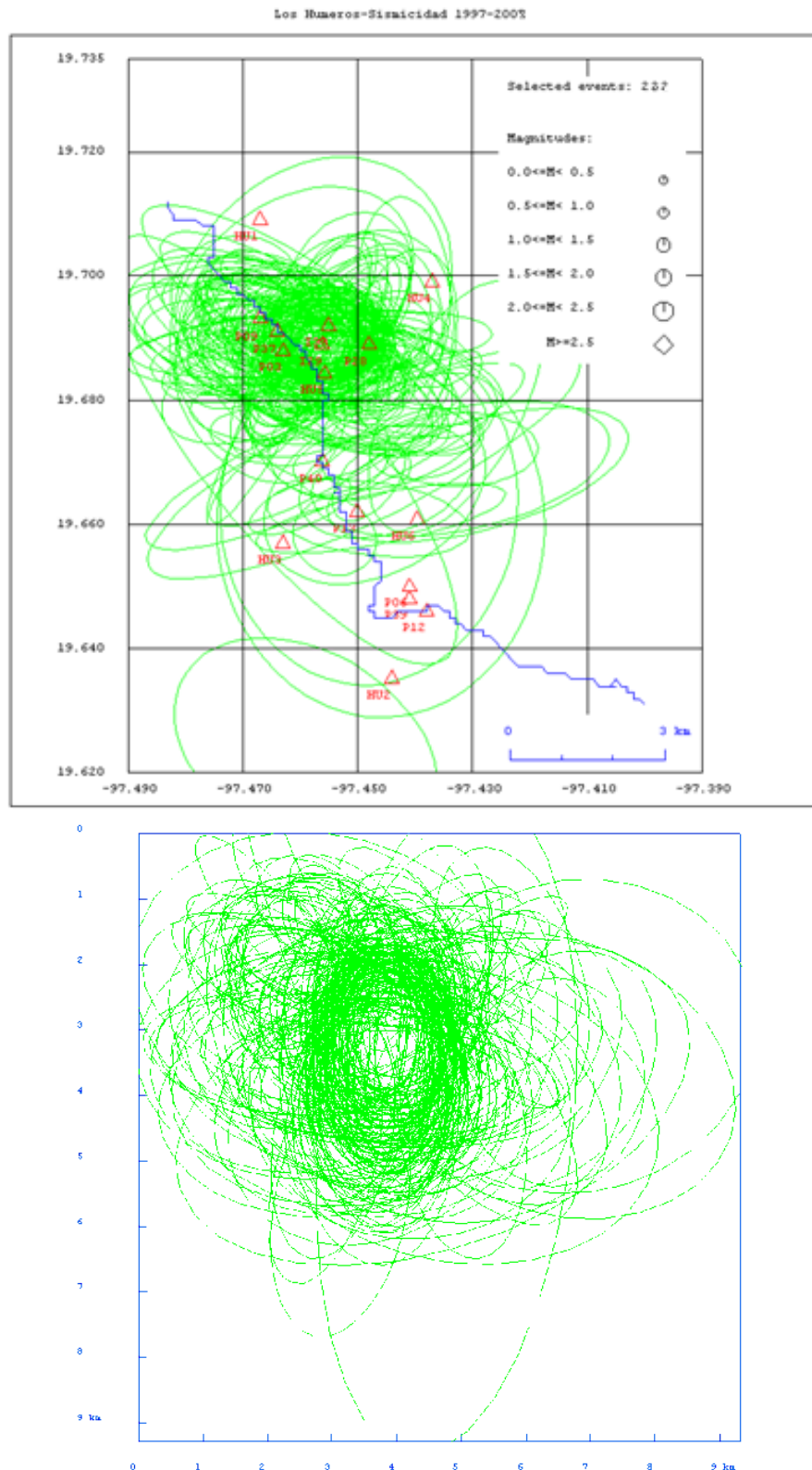


Figura 2.1.9. Elipses de error en la determinación de los hipocentros, campo Los Humeros; vista en planta y perfil E-W, periodo de diciembre 1997 a octubre 2007 (elipses verdes) (Lermo y cols., 2009).

### 2.1.6 Relación con las operaciones de campo

El proceso de explotación como lo hemos visto consiste en diversos trabajos y procedimientos, a lo largo de los proyectos se ha observado actividad sísmica asociada a las labores de inyección, estimulación y en menor cantidad a la producción; la forma de discretizar la relevancia de las actividades fue mediante la ubicación espacial de los eventos y la cantidad de sismos relacionados a los gastos que intervinieron en la operación, esta actividad se ha observado que puede ser medida y monitoreada en tiempo real, lo que permite mantener un control en los gastos de inyección y mantener un equilibrio en el ingreso y salida de fluidos en el yacimiento, además del movimiento interno de los fluidos y su relación con las estructuras principales.

#### 2.1.6.2 Relación con los pozos inyectoros

En el campo Los Humeros los estudios llevados a cabo por Romero (2009), señalan que de acuerdo a los valores de la entalpía medidos en el fondo de los pozos, aparentemente la producción no ha sido afectada por la inyección. Antayhua (2007), estudió la influencia de la inyección en el estado de esfuerzos del campo, observando una relación estrecha, al analizar estadísticamente la cantidad de sismos producidos, con las toneladas inyectadas de salmuera, llevando un estadística con datos continuos y discontinuos (apertura y cierre de pozos), logró observar un aumento proporcional del número de sismos a los gastos de inyección; se graficó la inyección de los pozos H29-H38, y se observa un incremento y decremento proporcional en la relación del gasto de inyección en el pozo I29 y la cantidad de sismos detectados en la estación S05, durante enero del 1999 hasta la primera interrupción de la inyección en el 2003, posteriormente existe un cambio en los gastos de inyección donde el pozo I38 el gasto del pozo I29 para mantener uniforme la inyección, continuando con la relación proporcional, consecuentemente al disminuir e interrumpir la inyección del pozo I29 en Mayo del 2004 nos indicaría una disminución en la sismicidad; no obstante el gasto se mantiene y es remplazado por el pozo I38, de esta forma que podemos observar que durante la mayor parte del periodo existe una relación directa entre el gasto de inyección y la cantidad de sismos locales (Figura 2.1.10, Antayhua, 2007).

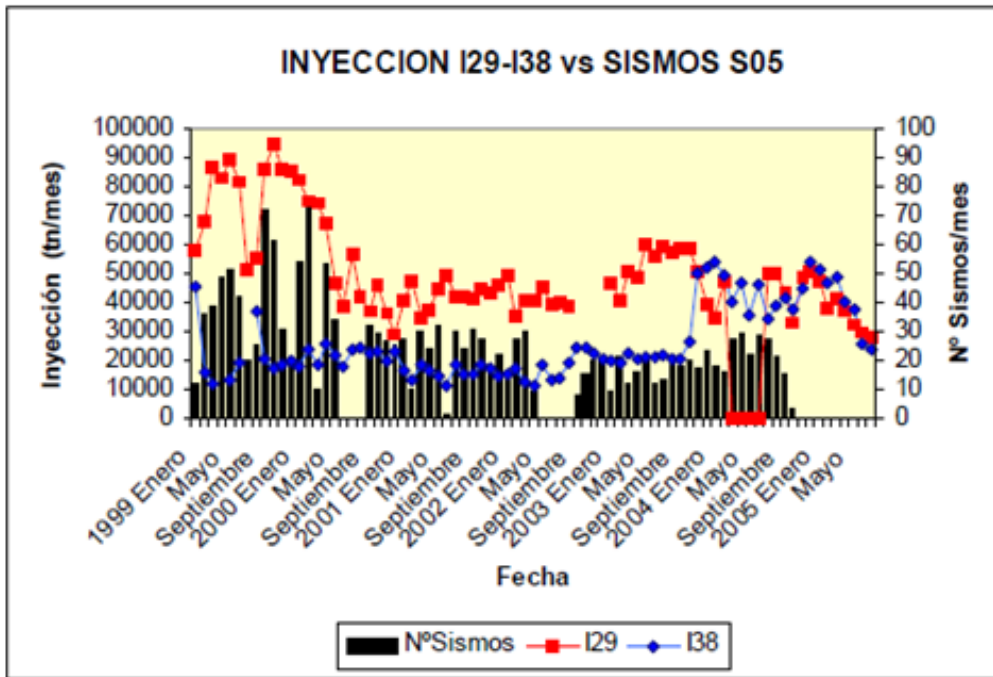


Figura 2.1.10. Correlación de la cantidad de inyección de agua en los pozos I29 e I38 y el número de sismos registrados en la estación S05. La inyección está expresada en toneladas por mes (t/mes) (línea roja) y el número de sismos por mes (barras negras) (Antayhua, 2007).

### 2.1.6.3 Relación con los pozos productores

En lo que respecta a la relación entre la producción y la cantidad de sismos, no se ha logrado definir de manera concreta la influencia y los efectos de la inyección en los pozos productores, Antayhua (2007) estudio también la relación de los pozos productores y la actividad sísmica local, relacionando los gastos de producción y el número de sismos locales durante casi 8 años en el campo geotérmico (Figura 2.1.11, gastos de producción en líneas de diferente color y la cantidad de sismos en barras amarillas). Tomando en consideración un periodo desde 1997, hasta junio del 2005, 6 pozos produjeron sin interrupciones (P7, P8, P9, P11, P19, P20) y el gasto de vapor se mantuvo constante; intermitentemente operaron 6 pozos productores (P17, P30, P32, P33, P36, P39), los pozos P33 y P36 fueron cerrados completamente por no lograr cubrir el gasto mínimo de producción; sin embargo alrededor de 8 pozos ubicados en la zona norte del campo geotérmico (P1, P9, P12, P15, P16, P31, P35, P37), presentaron un aumento en la producción principalmente el pozo P1 (línea rosa, Figura 2.1.11), el cual tuvo un aumento de casi 40%. En lo que respecta a la sismicidad, Antayhua



### 31 2.1 Campo Los Humeros

(2007), recopiló los eventos registrados en las estaciones más cercanas a los pozos productores, correlacionó los gastos y el número de sismos, y observó un incremento en la producción a partir del sismo ocurrido el 21 de enero del 2002 ( $M_w = 3.2$ ), el cual probablemente haya sido el inicio de un rompimiento y exista una expansión en los poros, lo que facilitó el flujo de los fluidos a través de las zonas permeables, aumentando la producción de vapor en el campo a pesar de la interrupción de algunos pozos productores (Figura 2.1.12).

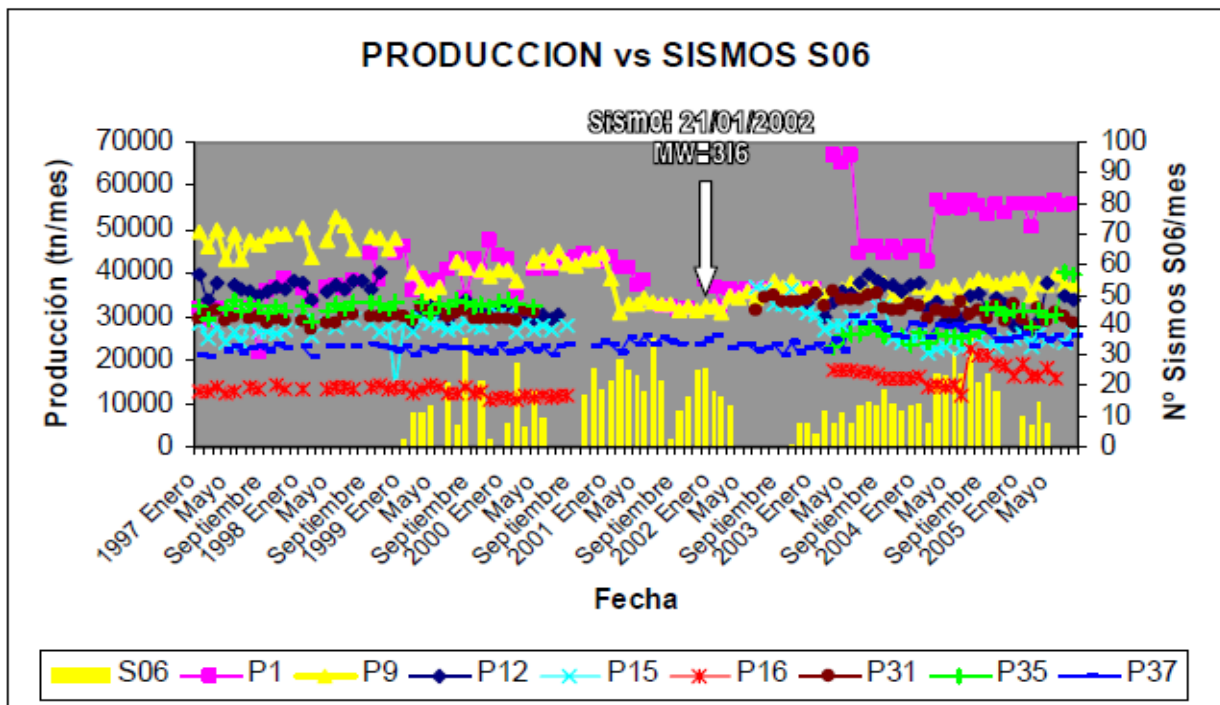
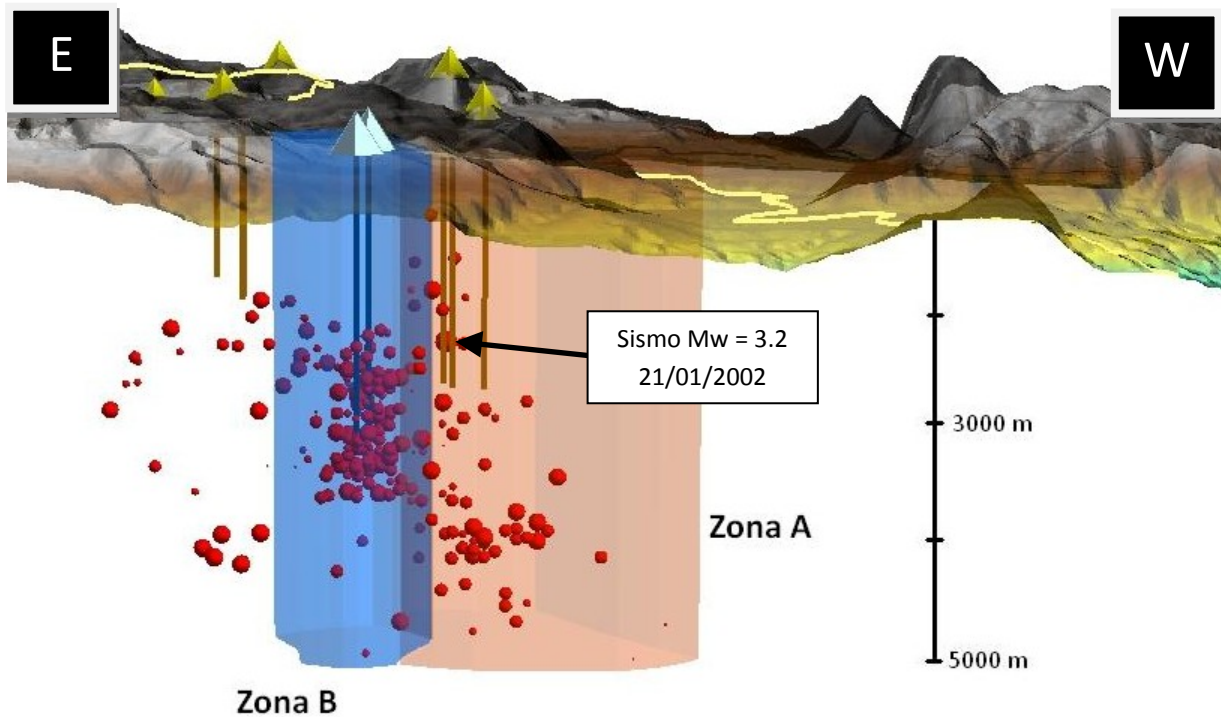


Figura 2.1.11. Correlación de la sismicidad registrada en la estación S06 y los gastos de producción, en los 8 pozos de mayor producción de vapor en el campo geotérmico de Los Humeros (Antayhua, 2007).



**Figura 2.1.12.** Perfil sísmico E-W con zonificación del campo Los Humeros; sismos en escala de magnitud (esferas rojas), Zona B (polígono Azul) y Zona A (polígono rojo).

### 2.1.7 Termoporoelasticidad

Debido a la extracción de calor, un yacimiento geotérmico se enfría con el paso del tiempo. Las rocas en yacimientos geotérmicos son porosas, compresibles y elásticas. La presencia de un fluido en movimiento dentro de los poros y fracturas modifica su respuesta mecánica. La elasticidad de la roca se evidencia por la compresión que resulta de la declinación en la presión del fluido, la cual reduce el volumen de los poros. Esta reducción del volumen del poro puede ser la fuente principal de liberación del líquido almacenado en la roca. La poroelasticidad explica cómo el líquido dentro de los poros soporta una porción de la carga que actúa sobre las rocas porosas. La parte restante de la carga total la soporta el esqueleto rocoso, formado por el volumen sólido y los poros. El esqueleto se trata como un sólido elástico, acoplado al flujo laminar de un fluido que obedece ciertas condiciones de equilibrio y continuidad. Cerca de los pozos inyectoros el enfriamiento de las rocas resulta en un cambio de la presión y un desplazamiento dentro del yacimiento, estos cambios incrementan la apertura de fracturas y por lo tanto de la permeabilidad, disminuyendo de acuerdo a la cercanía con los pozos inyectoros. Sin embargo al no mantener un barrido

### **33 2.1 Campo Los Humeros**

---

constante y uniforme, los caminos pueden enfriarse por consecuencia el poro debido a sus propiedades elásticas se contrae y endurece, causando un decremento en la permeabilidad, en algunos casos se ha logrado tal contracción que el fracturamiento se ha incrementado inmensamente. (Suarez, 2009)

En el campo Los Humeros se ha observado numerosa actividad sísmica en la zona norte, donde se encuentran los mayores gastos de producción e inyección, de la zona de mayor temperatura (310 °C); si se consideran los diferentes modelos conceptuales que relacionan la temperatura, la dirección y convergencia del flujo de fluidos (Figura 2.1.15), se entiende que la mayor cantidad de fluidos se dirige hacia la zona centro y norte del campo, lo cual incluye tanto fluido de origen geotérmico, como de origen meteórico (agua), que se filtran y contribuyen a la recarga del acuífero, adicionalmente hay un gran flujo por la inyección y debido a la alta presión en la zona, lo que ha ocasionado que los pozos productores se ubiquen alrededor y no al centro de la zona más caliente, como se logra observar en las Figuras 2.1.13 y 2.1.14; estos factores han sido detonadores primarios en la dilatación y expansión de los poros de la roca almacenadora de fluidos (calizas), además se concentran los mecanismos capaces de producir el fracturamiento del esqueleto rocoso; esta clase de fracturamiento es adicional al producido a través de la inyección y estimulación; por lo tanto debido al cambio en los esfuerzos se produce la actividad sísmica.

Ghassemi y cols. (2008), asociaron el efecto de termoporoelasticidad en diversos campos geotérmicos y petroleros, aduciendo la microsismicidad como un factor indicativo del efecto, además han presentado métodos y algoritmos para estimar el porcentaje de fracturamiento. Es necesario considerar el efecto elástico en los poros, para determinar no solo el porcentaje de sismos que corresponde al fracturamiento, sino complementar los estudios que refieren a un cambio de las propiedades y de comportamiento durante la explotación; el efecto de la termoporoelasticidad representa un mayor conocimiento de la permeabilidad en el yacimiento.



Estableciendo la relación entre los pozos inyectoros y la microsismicidad en el campo, con la localización espacial de los sismos y la relación entre los gastos de producción e inyección elaborada por Antayhua (2007), el análisis restringe la zona de alta temperatura como la región con mayor sismicidad, indicando que la zona de choque entre fluidos de diferentes temperaturas se encuentra en un radio de 1 km en la vecindad del pozo, además determinando que el fluido inyectado por gravedad, ha profundizado alrededor de 3.5 km y un radio en la vecindad a un kilómetro ahora en profundidad, la mayor concentración de sismicidad se localiza entorno a los pozos inyectoros y la zona de alta temperatura (Figuras 2.1.13, 2.1.14 y 2.1.15).

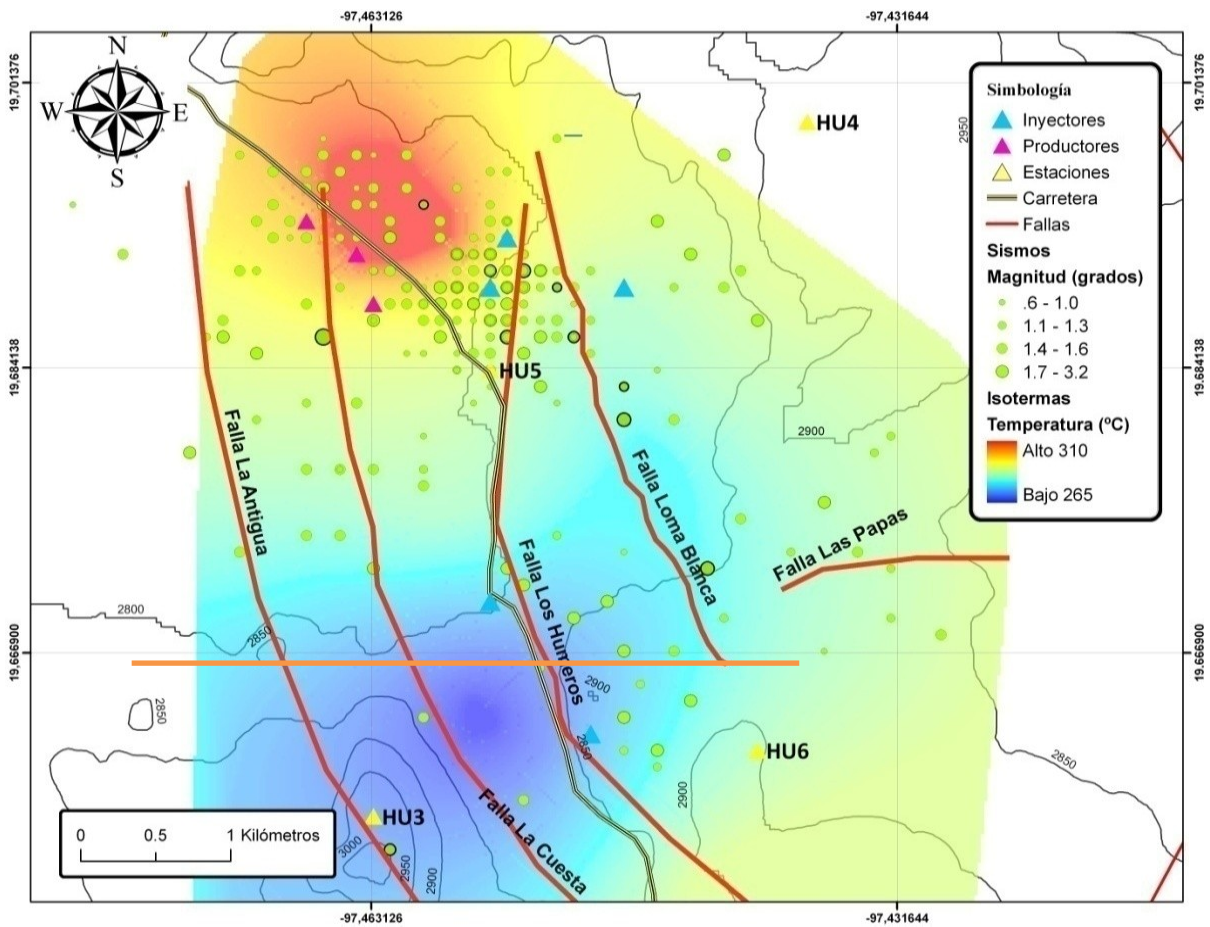


Figura 2.1.13. Mapa de isotermas con temperaturas de fondo, la actividad sísmica y las fallas principales en el campo Los Humeros; Vista 3D con dirección W-E (línea naranja), ver Figura 2.1.14.

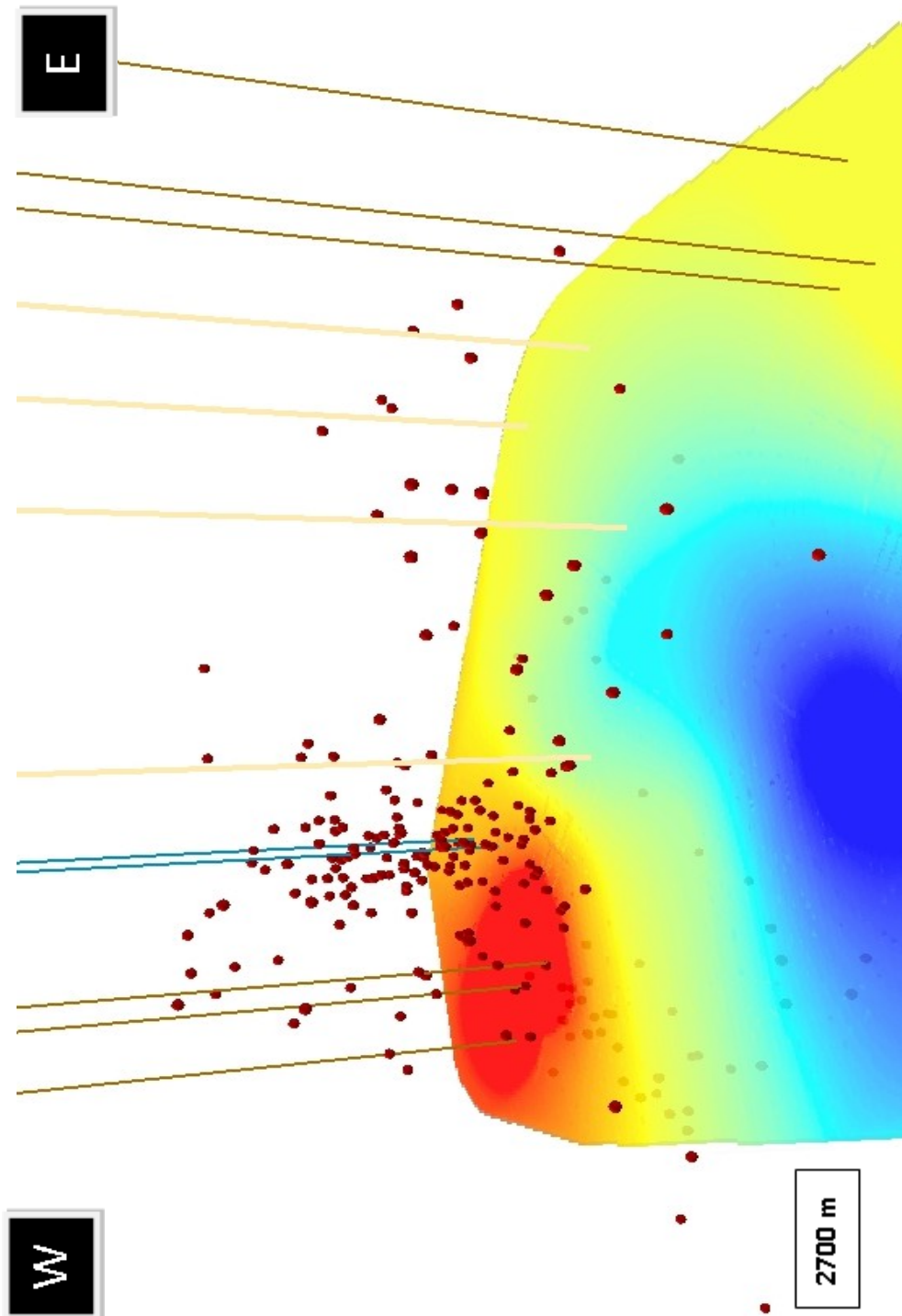


Figura 2.1.14. Vista 3D con dirección W-E y las isothermas a una profundidad de 2700 m en el campo Los Humeros, se observa la sismicidad (esferas rojas), la zona de mayor temperatura en color rojo, los pozos productores y en prueba (líneas naranjas) e inyectores (líneas azules).

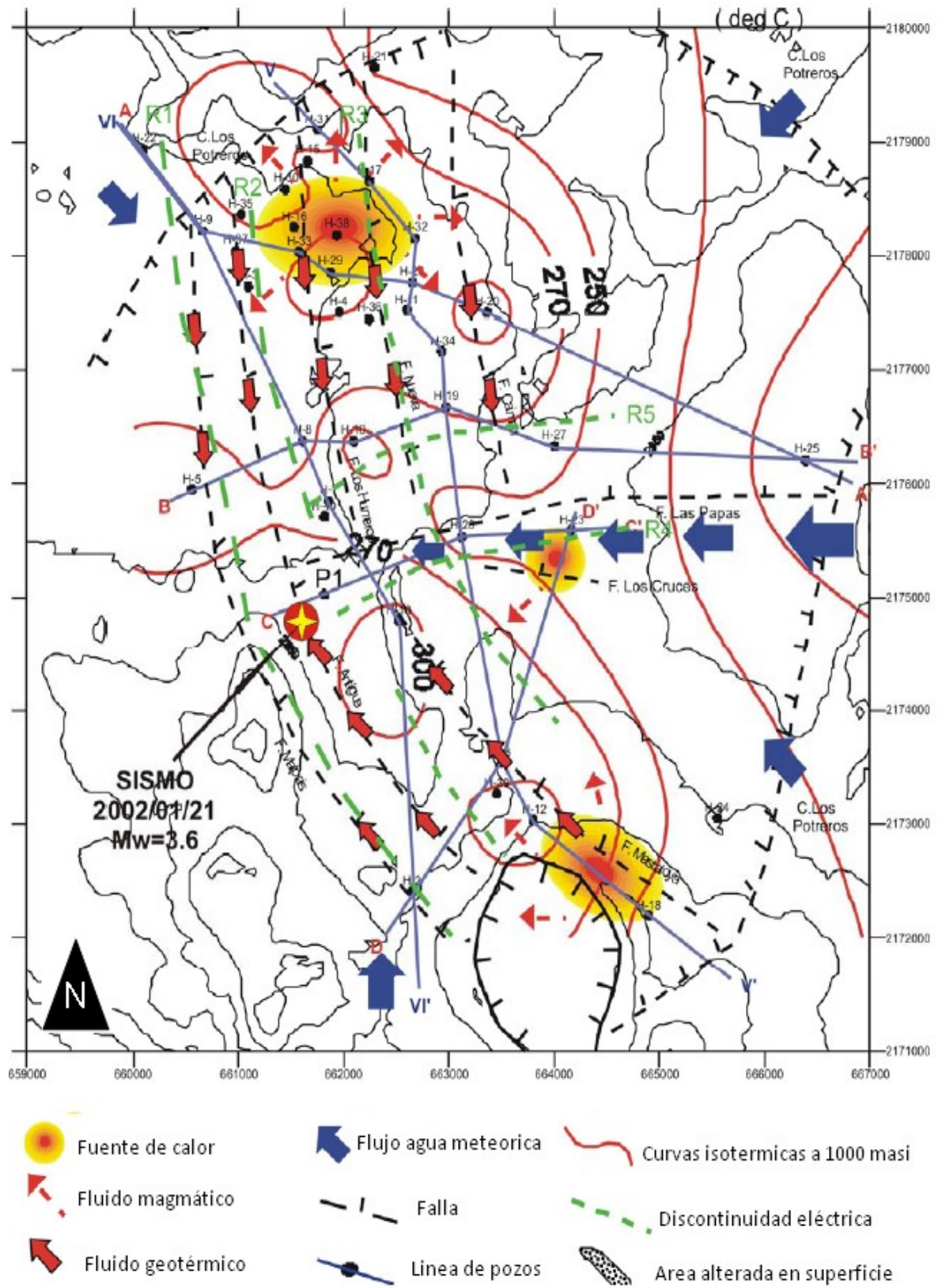


Figura 2.1.15. Modelo conceptual de Los Humeros (dirección de flujo) (Modificado de Antayhua, 2007).

## 2.2 Campo Los Azufres

### 2.2.1 Antecedentes

El campo geotérmico de Los Azufres se encuentra localizado a 200 kilómetros al oeste de la Ciudad de México. Los Azufres, debe su nombre a una acumulación pequeña de azufre nativo, rodeado por una zona de manifestaciones geotérmicas naturales. Se encuentran en el sector Noreste del Estado de Michoacán, a una elevación de 2800 m sobre el nivel medio del mar y rodeado por un bosque de pinos.

Los primeros estudios en este campo se efectuaron en los años cincuenta. En el año de 1977 se perforaron los primeros pozos productores, con los que se confirmó la existencia de un potencial energético de magnitud considerable. Actualmente la CFE tiene instalados en este campo 93 MWe, distribuidos en una unidad de condensación de 50 MWe, ocho unidades a contrapresión de 5 MW cada una y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MWe cada una. En el campo se han perforado más de 60 pozos con profundidades de entre 600 y 3,544 m, con una temperatura máxima de fondo de 358 °C. En esta zona el flujo de calor promedio es de 0.22 W/ m<sup>2</sup>, lo cual corresponde a un gradiente local de 117 °C/km (Suárez, 2000), que es casi cuatro veces mayor que el normal.

### 2.2.2 Geología y tectónica

El campo geotérmico Los Azufres tectónicamente está localizado en el sector central del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM). El CVTM ha sido el resultado de la subducción activa de la Placa de Cocos por debajo de México, a lo largo de la Trinchera Mesoamericana, formando un arco de tipo calco-alkalino. El área de estudio se encuentra localizada en una gran depresión tectónica, que se extiende desde Chápala hasta Querétaro, cuya sección sur se encuentra delimitada por bloques de falla inclinados al SE. La zona de fractura de Querétaro con dirección NNE-SSE, intercepta este tren estructural E-W. El sistema Querétaro podría representar la continuación al Sur de la provincia de valles y sierras (Figura 2.2.1a).



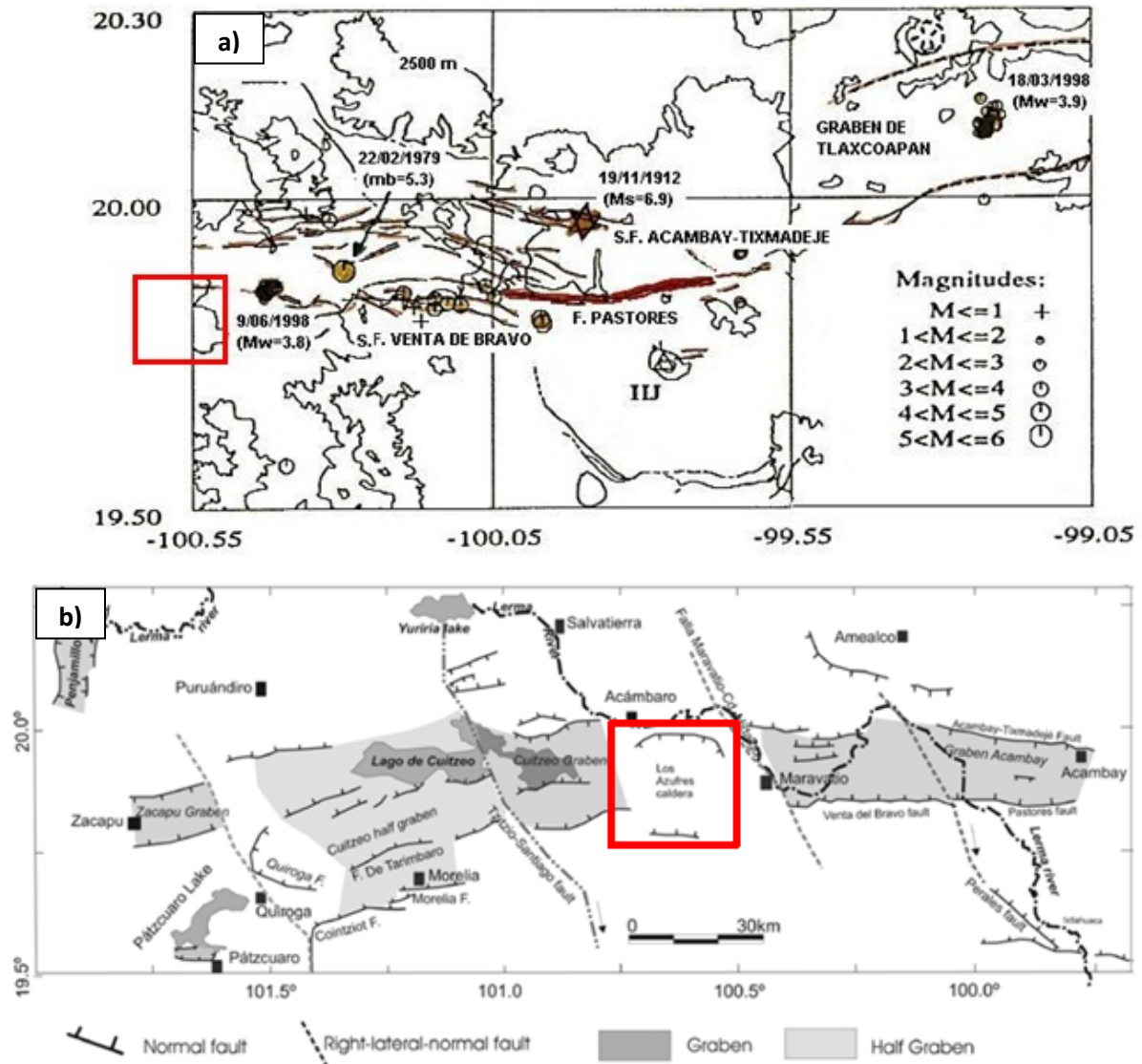


Figura 2.2.1a. Mapa topográfico y estructural con la ubicación del campo Los Azufres (Martínez y Nieto, 1990). Figura 2.2.1b. Graben de Acambay; fallas principales (líneas delgadas cafés) y círculos abiertos la sismicidad reciente, campo Los Azufres (cuadrado rojo).

La Figura 2.2.1a muestra la ubicación de la zona de Los Azufres (recuadro de color rojo), enmarcada en la región del Graben de Acambay; en esta figura se muestran con líneas delgadas oscuras las curvas de nivel del Graben y con líneas de color café oscuro las fallas reportadas por Martínez y Nieto (1990). En la parte superior se observan las estructuras principales de la zona; El Graben de Tlaxcoapan (Mora, 1986), Fallas de Venta de Bravo, Falla Pastores, Falla Sta. María Illucan (Figura 2.2.1b), también se puede observar una sismicidad

### **39 2.1 Campo Los Azufres**

---

relativamente reciente, se incluye en el mapa el sismo de 1912, ocurrido precisamente en el graben de Acambay, a una distancia de 80 km de la ciudad de México, y de magnitud 6.9 aproximadamente; también se incluyen las réplicas del temblor del 22 de febrero de 1979, así como otros eventos de menor magnitud que se han detectados a través de las estaciones sísmicas IJJ y IIC de la red de SISMEM. Recientemente, se presentaron en esta zona dos enjambres sísmicos, cuyos eventos principales fueron localizados, el primero en el poblado de Tlaxcoapan, Hgo. El 18 de marzo de 1998 ( $M_c=4.2$ ); y el segundo en el poblado de Maravatio, Mich., el 9 de junio de 1998 ( $M_c=3.8$ ).

#### **2.2.3 Estudios sismológicos**

El año 2000 es el tiempo que marca el inicio de los estudios sismológicos en el campo Los Azufres; Rodríguez y cols., 2001, inician un análisis del estado del equipo sismológico de la red permanente del campo geotérmico, observando errores en el tiempo de registro y problemas que limitan el intervalo de frecuencia en la medición; sin embargo manifiestan que para un monitoreo preliminar el equipo si es adecuado, sustituyendo los equipos por instrumentos con un tiempo más confiable.

Rodríguez y cols., 2001, también lograron localizar siete sismos locales que definen tres regiones sismogénicas: una al occidente del campo geotérmico, cerca del complejo volcánico; una segunda en la zona noreste y una tercera dentro del campo. Ellos manifiestan que la limitación principal a la detección de sismicidad local, es el alto nivel de ruido imperante provocado por el campo geotérmico; por tal razón la red sísmica tiene que tener un máximo de 5 kilómetros de espaciamiento entre estaciones, por lo que para el monitoreo se tendrá que realizar por objetivos estructurales claros.

Por otro lado, Valdés y cols., 2005, durante el período de noviembre de 2004 a noviembre de 2005, registraron 808 eventos, de los cuales 74 sismos fueron asociados a la actividad tectónica y 30 fueron localizados con tres o más estaciones. Los sismos, cuyas magnitudes varían entre 0.1 y 1.8 grados, se localizaron principalmente en el sector Oeste de la red sísmica. En la actividad sísmica reportada, observaron dos enjambres de sismos, uno en enero y otro en septiembre de 2005; sugieren que el campo geotérmico de los Azufres no

presenta cambios importantes en el estado de esfuerzos, debido a la inyección de agua y extracción de vapor.

En el 2008 y principios del 2009 Lermo y cols., (2009) realizaron un estudio con la distribución de estaciones descrita en la Tabla 2.2.1, observando actividad en la zona norte del campo, cercana a la falla La Cumbre, descrito al recopilar y relocalizar 13 eventos observados en un estudio de Valdez 2005, ajustando el modelo de velocidades y los diferentes arribos de onda.

Desde febrero del 2009, Valdés (2009), continúa con el análisis de sismicidad detallando 108 eventos locales y regionales, relacionados al sistema tectónico de la región.

## 2.2.4 Monitoreo sísmico

### 2.2.4.1 Estaciones sismológicas

La red de estaciones que monitorearon y estuvieron en operación de forma temporal y autónoma en el campo geotérmico de Los Azufres, está conformada por ocho estaciones sismológicas. La estaciones (Figura 2.2.2) se posicionaron de acuerdo al último periodo de estudio comprendido desde el año 2000 hasta el 2005 (Rodríguez y cols., 2001). En la Tabla 2.2.1, se muestran las coordenadas geográficas, código y características principales de la red que se utilizó para el monitoreo.



Figura 2.2.2. Parte superior vista panorámica de la caseta sismológica El Mono (MOAZ); la ubicación de la celda solar y el GPS. Parte inferior; sismómetro *Guralp* T40-0008, el registrador *Reftek* modelo 72-A08 de 24 bits y un disco duro de 2 GB para almacenar información sísmica continua.



Tabla 2.2.1. Características principales de las estaciones de la red sísmica autónoma del campo geotérmico Los Azufres.

Descripción	Código	Registrador Sensor No. Serie	Latitud S (Grados, minutos decimales)	Longitud W (Grados, minutos decimales)	Altura (Metros)
<b>Sismógrafo Período largo</b>	El Mono MOAZ	Reftek 72A 08 DAS 1097; SCSY 51416 Guralp T4C30 (2Gb)	19°46.064	100°40.988	2822
<b>Sismógrafo Período largo</b>	Yerbabuena YEAZ	Guralp CMG6TD- 0001 T6621/B317 (2Gb)	19°48.405	100°43.168	2533
<b>Sismógrafo Período largo</b>	Bucio BUAZ	Reftek 72A 08 DAS 1004; SCSY 52023 Guralp T4033 (8Gb)	19°46.868	100°43.719	2552
<b>Sismógrafo Período largo</b>	Agua Escondida AEAZ	Reftek 72A 08 DAS 1003; SCSY 52021 Guralp T4291 (3Gb)	19°49.440	100°41.959	2765
<b>Sismógrafo Período largo</b>	El Chino CHAZ	Guralp CMG6TD- 0001 T6710/B525 (2Gb)	19°48.490	100°41.110	2817
<b>Sismógrafo Período corto</b>	Residencia REAZ	Sara SR04 Serie # 213 GS11D-3D T=4.5s	19°47.446	100°39.671	2860
<b>Acelerógrafo 24 bits</b>	Nopalito NOAZ	Kinematics K2 Serie # 1188 Episensor 1G	19°50.101	100°40.677	2837
<b>Sismógrafo Período corto</b>	Maritaro MAAZ	Spregnether DR-3016 Serie # 10725 Spregnether T=1.0s Serie # 10799	19°49.357	100°40.242	2835

## **2.2.5 Análisis de la actividad sísmica**

Para el análisis de la actividad sísmica, se tomaron en cuenta únicamente los registros locales y regionales, los eventos o registros lejanos, y tremores, no se analizaron por qué no forman parte de los objetivos de la tesis.

### **2.2.5.1 Modelo de velocidades**

El modelo de velocidades utilizado, fue tomado del estudio de Valdés y Pérez (2007); donde se corroboró mediante ensayo y error, la congruencia en la localización de los eventos y la actividad en las estructuras sismogénicas, este modelo se presenta a continuación:

**Tabla 2.2.2. Modelo de velocidades para el campo Los Azufres.**

<b>Velocidad</b>	<b>Profundidad</b>
<b>Onda P</b>	<b>(Km)</b>
<b>(Km/s)</b>	
<b>3.5</b>	<b>0.0</b>
<b>4.0</b>	<b>1.0</b>
<b>6.0</b>	<b>3.0</b>
<b>6.5</b>	<b>15.0</b>

El modelo utilizado, difiere en la velocidad de la primera capa, de 3.5 Km/s, comparado con el usado por Rodríguez (2001), el cual propone una velocidad de 2.1 Km/s para el estrato. Los resultados obtenidos con la velocidad baja de Rodríguez, producen errores mayores en los residuales de tiempo y parecen bajos para el tipo de roca observada en el primer kilómetro de profundidad.

### 2.2.5.2 Localización hipocentral

Para la localización hipocentral en el campo los Azufres se conjuntaron un total de 129 sismos, examinados por tres diferentes autores; Lermo y cols., 2009, localizaron un total de 23 sismos locales relacionados al campo; Valdés (2009), logró discretizar 108 eventos sísmicos, los cuales adjudicó a movimientos tectónicos en la zona, localizados principalmente en la zona oeste del campo; para el estudio presente se tomaron los datos geográficos de 106 eventos con error medio cuadrático (*RMS*, por su siglas en inglés) menor a 0.36 y se ubicaron espacialmente; adicionalmente se incluyó el evento localizado por Rodríguez (2000) ya que su ubicación se atribuye precisamente a la zona norte del campo, los sismos seleccionados presentan una magnitud de 0.1 a 1.9 grados, profundidad variando de 0.8 a 6 km, con *RMS*, 0.01 de 0.36 km<sup>2</sup>; la información de la localización hipocentral detallada se encuentra en la Tabla A2 del Anexo A.

### 2.2.5.3 Distribución en superficie y en profundidad de los sismos seleccionados

En la Figura 2.2.3, se observan distribuidos los 129 eventos seleccionados de color verde, con una escala gradual de magnitud; la mayoría de la actividad se concentra en la zona norte alrededor de los pozos inyectoros importantes del campo, los cuales cuentan con la mayor cantidad de gasto de salmuera en la inyección, la distribución de los eventos también se logra asociar a la activación de las fallas colindantes principales a los pozos inyectoros ubicados en la zona norte del campo. La Falla La Cumbre y el Chino, son precisamente las que confirman la presencia de enjambres sísmicos en las zonas cercanas a las estaciones de diagnóstico, así como los enjambre observados por Valdés durante los meses de abril, junio, y finales de agosto y octubre del 2009. En zonas lejanas al campo fuera del mapa de referencia, se encuentran dispersos algunos eventos asociados a la actividad tectónica en el graben de Acambay.

Relacionando la ubicación de los sismos con los pozos operativos en el campo, es notoria la cercanía espacial entre los eventos y los pozos inyectoros, asimismo lejanos a los productores; esta es una observación importante en que se señala nuevamente la asociación que existe entre el proceso de inyección y los cambios de esfuerzos que producen microsismicidad. En el perfil sísmico (Figura 2.2.4) se logra observar una cantidad numerosa

## 45 2.1 Campo Los Azufres

---

de sismos agrupados y alineados en diversos periodos y estudios, resaltando la activación de las estructuras colindantes con los pozos, 8 eventos localizados por Lermo (2009), fueron asociados con la actividad de la Falla La Cumbre (polígono rojo); posteriormente la ubicación espacial de al menos 35 los sismos localizados por Valdés (2009), confirman la alineación de la misma falla y adicionan actividad en la Falla El Chino (polígono azul), los estudios geológicos y el análisis de sismicidad en la zona confirman la posición y los eventos sísmicos su activación, permitiendo visualizar su rumbo hacia el norte y un echado aproximado de 45°.

La distribución de los eventos se dividió en forma similar a los demás campos geotérmicos, en la Zona A cercana a los pozos productores, Zona B cubriendo los pozos inyectores principales y los eventos dispersos en el campo fuera de la red de monitoreo, asociados posiblemente a los movimientos tectónicos regionales (Figura 2.2.4). De acuerdo a la Figura 2.2.5 el porcentaje mayor de sismos se localiza en la zona de los pozos inyectores (Zona B), en menor cantidad se ubican en la Zona A, donde se alcanza a observar una acumulación reciente cercana al pozo inyector, posiblemente causada por un aumento en los gastos de inyección en el pozo. Los sismos asociados a la tectónica se localizan principalmente en la región sur del campo.

En la Figura 2.2.7 se muestran las elipses de error tanto en planta como en profundidad, observándose el mismo patrón comentado en la localización; siendo estos errores son mayores a los tres kilómetros para los sismos localizados con tres estaciones, mientras que para los localizados con cuatro o más estaciones los errores fueron menores a tres km kilómetros.

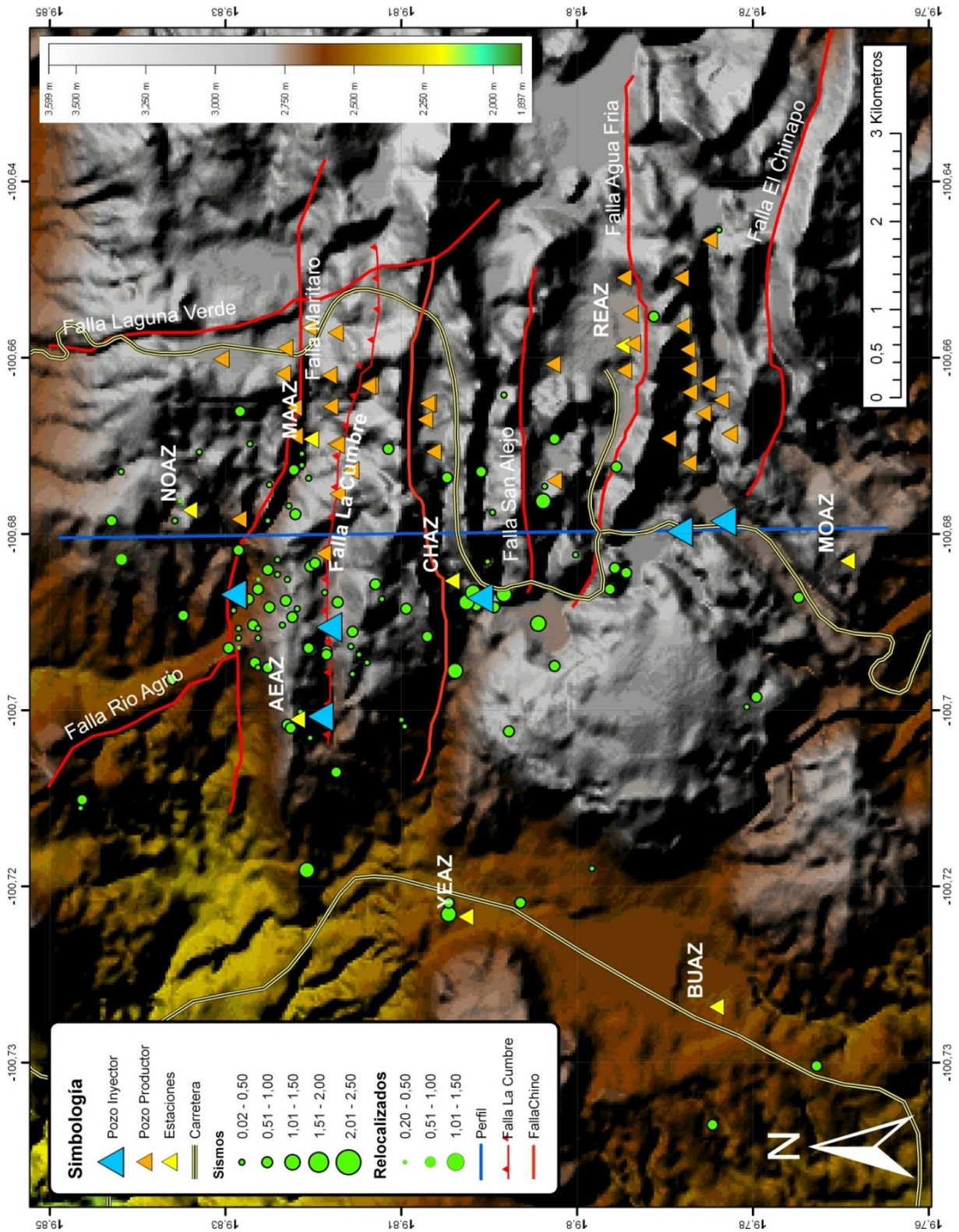


Figura 2.2.3. Mapa geomorfológico del campo geotérmico Los Azufres; se muestra la distribución espacial de los 129 sismos seleccionados.

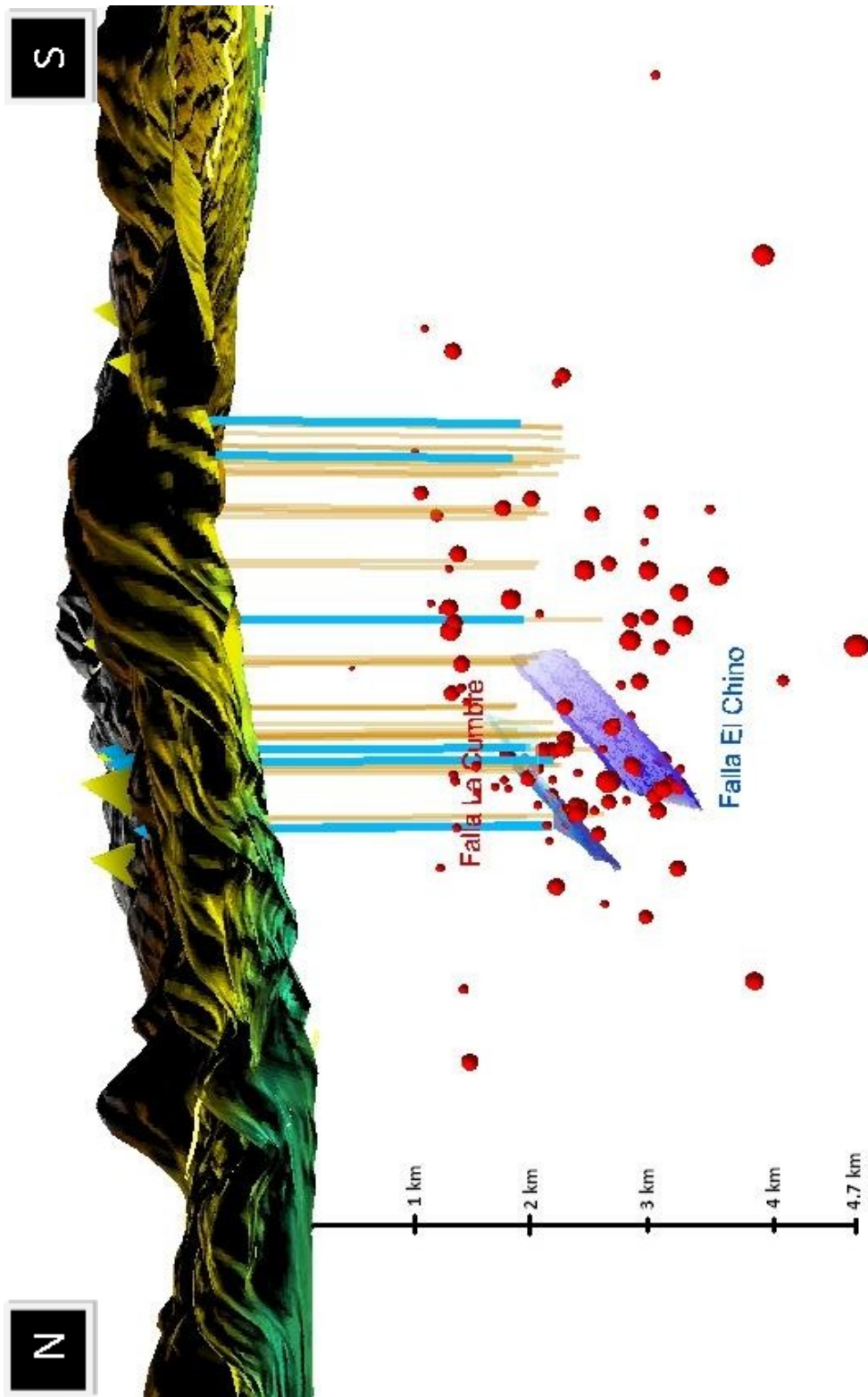
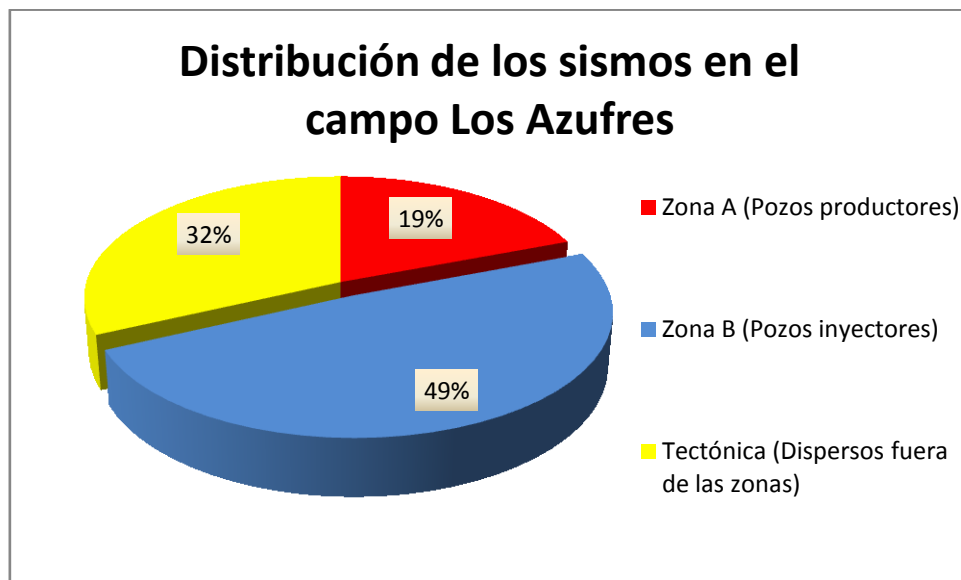
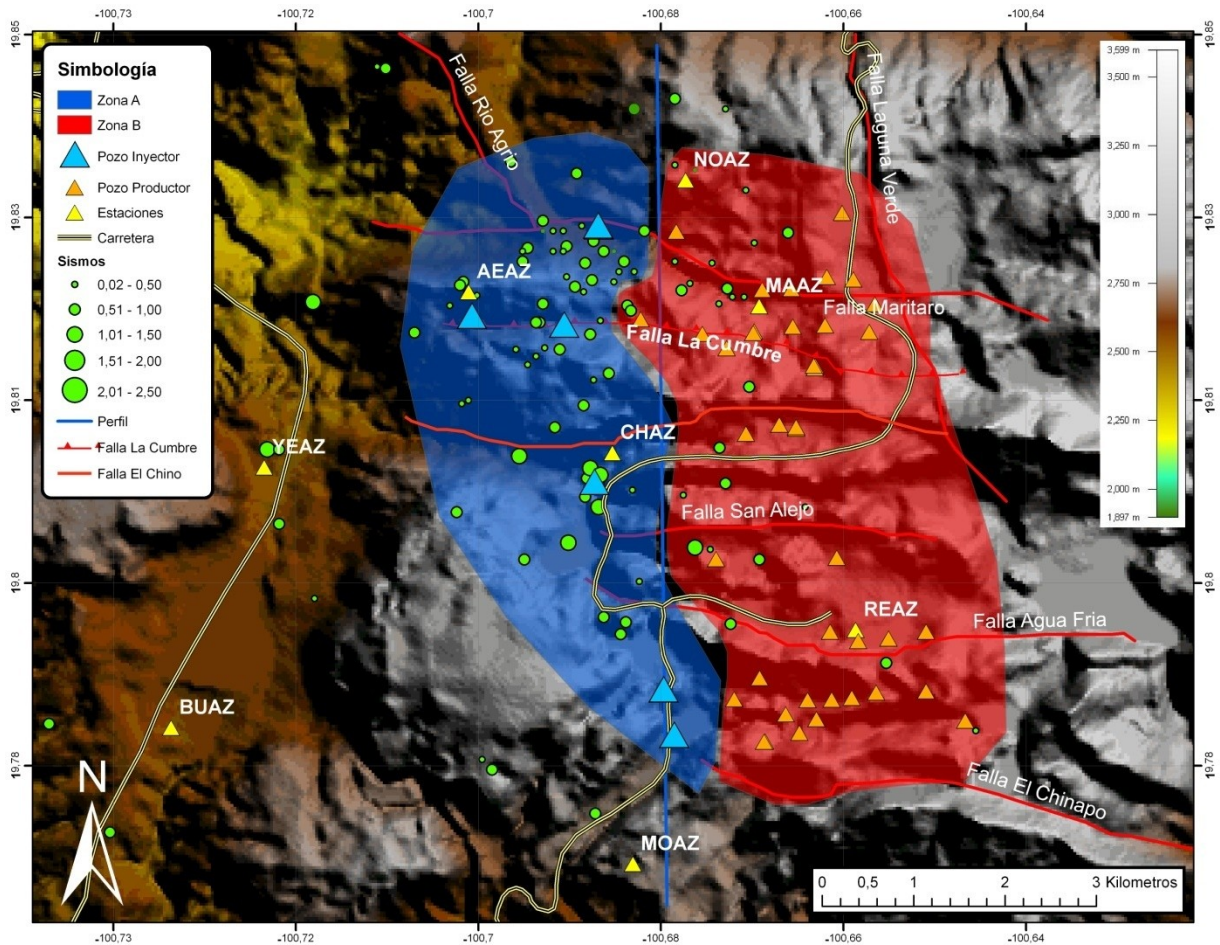


Figura 2.2.4. Perfil sísmico N-S del campo Los Azufres; sismicidad (esferas rojas), pozos inyectoros (líneas azules), pozos productores (líneas naranjas), estaciones sismológicas (tetraedros amarillos), Falla La Cumbre (polígono rojo) y Falla El Chino (polígono azul).





Figuras 2.2.5 y 2.2.6. Zonificación del campo Los Azufres; vista en planta figura superior y porcentaje de distribución para los 129 sismos en las zonas respectivas.

## 49 2.1 Campo Los Azufres

SISMICIDAD EN AZUFRES 2000-2009

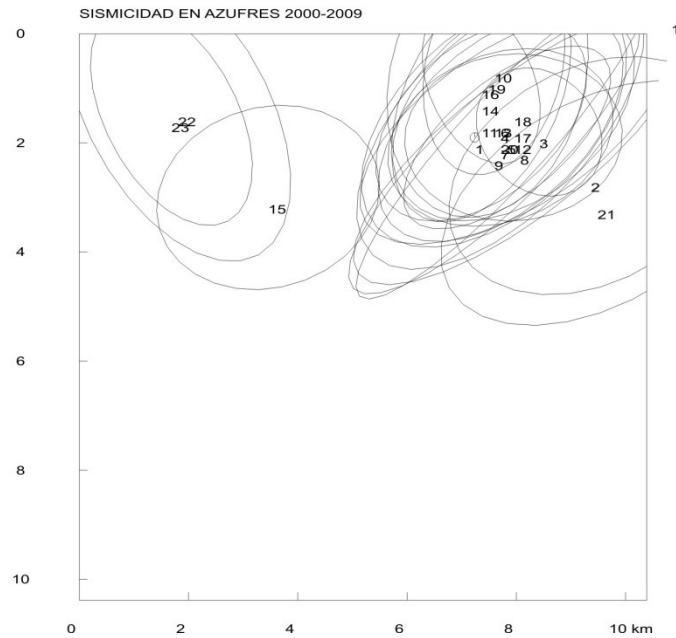
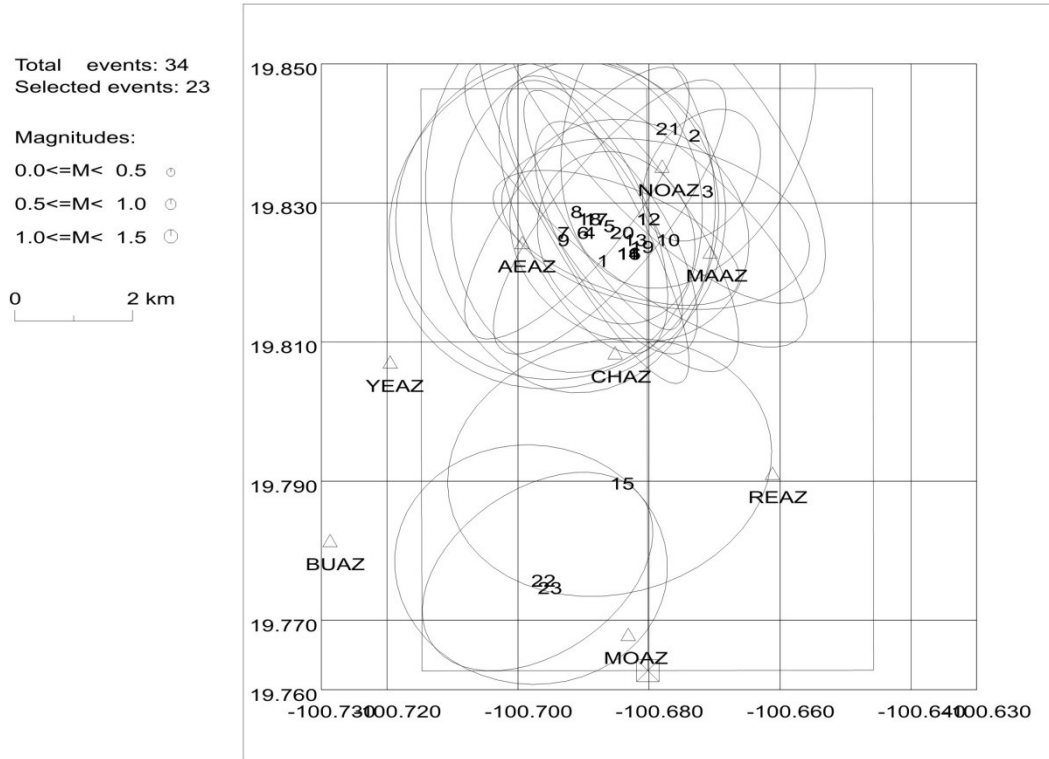


Figura 2.2.7. Elipses de error en la determinación de los hipocentros (elipses negras); vista en planta y en dirección N-S de los 23 sismos analizados por Lermo y cols., 2009.



## **2.3 Campo Tres Vírgenes**

### **2.3.1 Antecedentes**

El campo geotérmico de Las Tres Vírgenes se localiza en la parte media de la península de Baja California 30 km al norte de la Ciudad de Santa Rosalía; al igual que los campos geotérmicos principales se encuentra dentro de un sistema volcánico, fuera del Cinturón Volcánico Trans-mexicano CVTM; a mediados del 2001 comenzaron a operar las primeras dos unidades turbogeneradoras a condensación de 5 MW cada una, dando capacidad instalada total de 10 MWe, ubicando al campo en 4to por su capacidad de generación eléctrica, logrando alcanzar la categoría de central geotermoeléctrica; la CFE ha perforado en total 12 pozos, 10 productores (en prueba pozos P11, P13D y 4D) y 2 inyectores; el último pozo productor se terminó a finales del año 2009.

### **2.3.2 Geología y tectónica**

La geología del área de Las Tres Vírgenes ha sido analizada detalladamente, por medio de estudios realizados en la superficie y complementados con el análisis de la información obtenida durante la perforación de los pozos. La Región del complejo volcánico en el que se encuentra el campo geotérmico, está ubicada en el extremo E de la península de Baja California Sur; 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 favoreció las condiciones termodinámicas en el subsuelo para la presencia del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, siendo económicamente rentable para la demanda energética de la región.

La litoestratigrafía como la estructura geológica del campo están influenciadas fuertemente por fallas y vulcanismo reciente y activo, sobre un basamento granítico que se formó hace unos 84 millones de años durante el periodo Cretáceo (65 a 136 m.a.). Los granitos constituyen el extremo sur de una región de grandes intrusiones, las que hacia el sur le dan paso a una secuencia volcánico – sedimentaria que se depositó durante la época del Mioceno (12 – 26 m.a.). En esta intersección, a lo largo del borde Este de la península de Baja California, se encuentran los tres centros volcánicos jóvenes (Figura 2.3.1):

## 51 2.3 Campo Tres Vírgenes

---

- I. La Caldera Reforma (activa hace entre 4 y 1.5 m.a.)
- II. El Complejo Riolítico Aguajito (0.9 a 0.57 m.a.)
- III. El Complejo Las Tres Vírgenes

El complejo Las Tres Vírgenes creció de N a S dentro de una zona de fallas y fracturas con tendencia NO - SE ligeramente más antiguas. Este complejo comprende: dos pequeños volcanes dacíticos al norte: El Viejo (cuya actividad se inició hace 0.44 m.a.), y El Azufre (cerca de 0.28 m.a.), el Domo dacítico El Potrero, que es la manifestación más reciente hacia el norte, y un volcán compuesto más joven y todavía activo hacia el sur: el Volcán La Virgen.

Con respecto a la geología estructural además de los volcanes, la manifestación predominante en el área es el conjunto de fallas con dirección NO – SE (Figura 2.3.1). La falla en el extremo NE es El Azufre, que en general yace a lo largo de la depresión topográfica entre el Volcán El Viejo al SO y el complejo Aguajito al NE. La falla al extremo SO es la Falla La Virgen, que pasa a través de la parte superior del Volcán La Virgen.

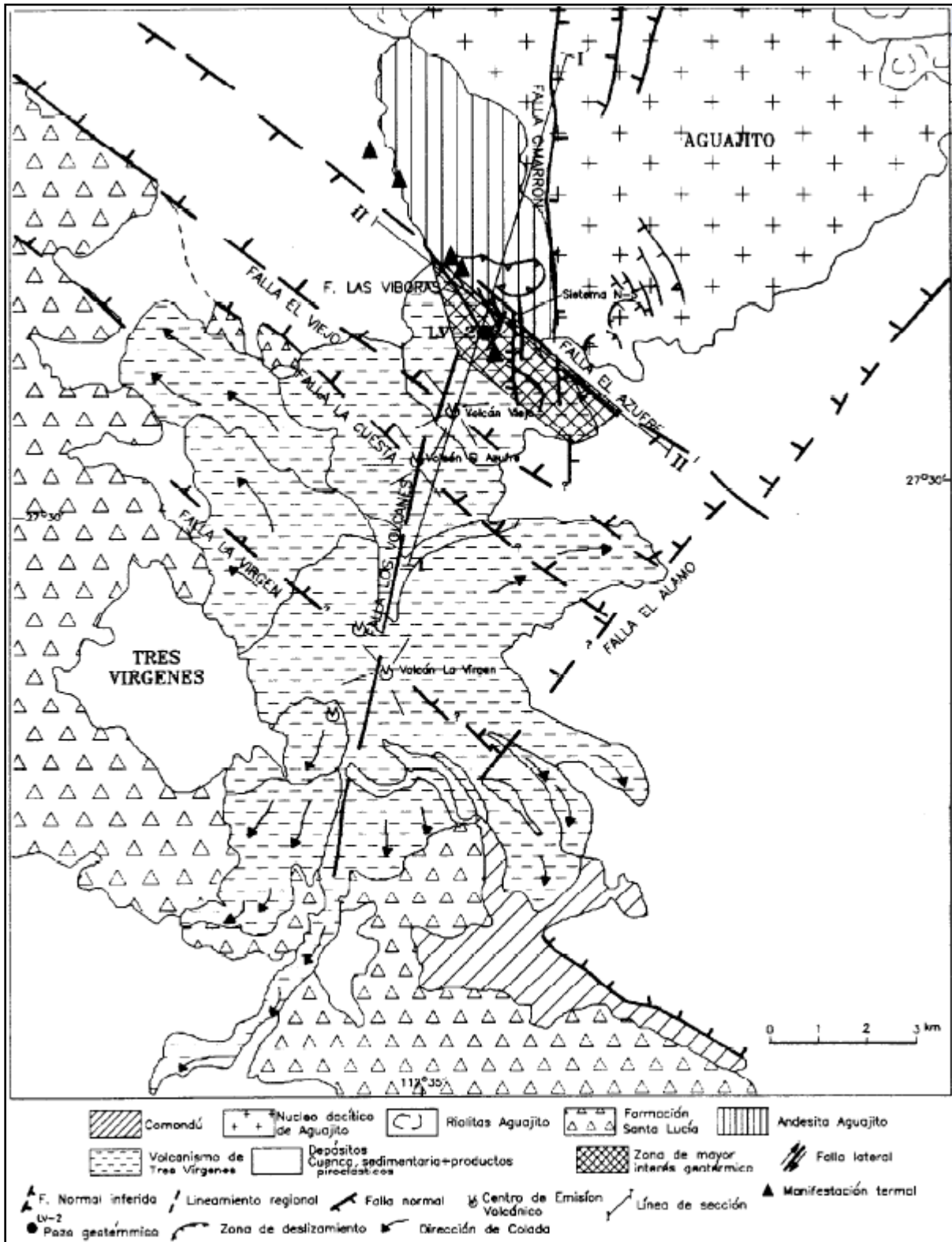


Figura 2.3.1. Mapa geológico a detalle de la zona geotérmica de las Tres Vírgenes (López, 1993).

### 2.3.3 Estudios sismológicos

El estudio de la sismicidad en la región geotérmica de Tres Vírgenes y sus alrededores inició en 1992 y ha continuado con interrupciones hasta la actualidad. Tanto los primeros trabajos (Guerrero-Guadarrama, 1997), como el último (Rodríguez, 2000) consideran a esta región como una zona de alta sismicidad. El trabajo de Rodríguez (2000) logró 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 en el complejo volcánico de las Tres Vírgenes; de los cuales eligió los 14 eventos mejor localizados y los asocia a las trazas de las fallas geológicas 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 ha permitido registrar 17 sismos, los mismos que se distribuyen en los extremos y sobre las trazas de los sistemas de fallas presentes. De estos 17 sismos se han seleccionado seis de ellos, debido a que fueron localizados en la zona de mayor interés de este estudio. 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 transcurrentes. En consecuencia, el análisis de la actividad sísmica en superficie, en profundidad y sus mecanismos focales, han permitido realizar una interpretación y la configuración posible de la sismotectónica de la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes.

Nuevamente de Septiembre a Diciembre del 2004, se realizó el monitoreo sísmico del campo geotérmico, logrando en esta ocasión localizar 37 sismos, de los cuales 22 se ubican dentro de la zona geotérmica de mayor importancia, a profundidades del orden de 0.4 a 4.0 km y magnitudes pequeñas típicas de sismos locales (0.7 a 2.2  $M_d$ ), logrando definir dos zonas de importancia asociadas: la primera al sistema de fallas El Volcán (Zona A) y la segunda asociada al pozo inyector LV-8 (Zona B). Por otro lado, de acuerdo a la distribución

sísmica de este monitoreo de 16 meses (septiembre del 2003 a diciembre del 2004), se puede concluir que el sistema de fallas más activo es El Volcán.

Durante el 2005 y principios del 2006, el monitoreo sísmico del campo geotérmico fue limitado; por lo que fue difícil obtener información detallada de ese periodo; sin embargo para el mes de mayo a agosto 2006, nuevamente se instaló una red temporal, la cual complementó a la red permanente, logando definir una secuencia sísmica alrededor del Volcán La Virgen, sobre la falla del mismo nombre. Probablemente esta secuencia inició el 31 de mayo; después de este sismo, comenzó la secuencia el 3 de junio con unos 20 sismos reconocidos, de los cuales se pudo localizar nueve sismos en ese mismo día. Estos nueve sismos, junto con otra secuencia registrada el día 7 de julio, permiten delinear la zona de fallamiento de la falla de La Virgen. Las características de esta falla se corroboraron con la construcción de un mecanismo focal simple, interpretada como una falla normal. Finalmente, de acuerdo a la distribución sísmica del monitoreo de 16 meses (septiembre del 2003 a Diciembre del 2004), en este periodo de cuatro meses se puede concluir que los sistemas de fallas más activos, son El Partido, y la reactivación de la Falla La Virgen, ya que han continuado su actividad durante este periodo, posiblemente influenciados por el flujo de fluidos en dirección SO – NE.

### **2.3.4 Monitoreo sísmico**

#### **2.3.4.1 Estaciones sismológicas**

Actualmente el campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes, está instrumentado con un total de ocho estaciones sismológicas (telemétricas, temporales y autónomas). A partir del año 2007 se han actualizado gradualmente los equipos con más de 10 años de antigüedad por parte del Instituto de Ingeniería mediante diversos convenios; en la Tabla 2.3.1, se muestran sus coordenadas geográficas y altitud de cada una de estas estaciones, así como el de la repetidora y de la estación central.

Tabla 2.3.1. Características principales de las estaciones sísmicas de la red de monitoreo en el campo Tres Vírgenes.

Descripción	Código	Registrador - Sensor	Latitud S (Grados, minutos decimales)	Longitud W (Grados, minutos decimales)	Altura (Metros)
<b>Sismógrafo Período largo</b>	TV01 Campamento	Guralp Sensor CMG 40T Serie T4C30 Registrador CMG DM24 Serie A1541	27°32.02	-112°34.04	710
<b>Sismógrafo Período corto</b>	TV02	Sara Serie # 211	27°30.30	-112°33.55	780
<b>Acelerógrafo</b>	TV03 km 8	K2-EPISENSOR Serie # 1183	27°28.37	-112°31.77	460
<b>Sismógrafo Período largo</b>	TV04 San Alberto	Guralp Sensor CMG 40T Serie T4197 Registrador CMG-DM24 serie B897	27°32.469	-112°37.045	360
<b>Sismógrafo Período largo</b>	TV05 San Jorge	Guralp Sensor CMG 6TD Serie # T6705/B522	27°30.840	-112°37.853	400
<b>Sismógrafo Período largo</b>	TV06 La Cueva	Guralp Sensor CMG 6TD Serie T6709	27°34.31	-112°37'13'	300
<b>Sismógrafo Período largo</b>	TV11 El Azufre	Guralp Sensor CMG 6TD Serie # T6689/B531	27°29.53	-112°34.67	968
<b>Sismógrafo Período largo</b>	TV18 El cardón	Guralp Sensor CMG 6TD Serie T4C29 registrador CMG DM24- 2000	27°30.388	-112°32.42	366
<b>REPETIDORA</b>			27°28.18	-112°35.49	1916
<b>ESTACIÓN CENTRAL</b>			27°30.30	-112°33.55	780

## 2.3.5 Análisis de la actividad sísmica

### 2.3.5.1 Modelo de Velocidades

Para el estudio presente se ha utilizado el modelo de velocidad presentado en la Tabla 2.3.2 y es el mismo que utilizó Rodríguez y cols., 2000, en el estudio de la actividad sísmica dentro del campo geotérmico durante el periodo Enero a Junio de 1999.

**Tabla 2.3.2. Modelo de velocidades, campo Tres Vírgenes.**

Velocidad onda P (km/s)	Profundidad (km)
1.2	0.0
3.3	0.2
5.6	1.0
6.3	7.0
7.6	11.0
8.2	25.0

### 2.3.5.2 Localización Hipocentral

Como se ha discutido en el estudio de Rodríguez y cols., 2000, la selección de información o eventos para determinar su localización hipocentral representa una tarea difícil de realizar, los eventos recopilados localizados por los diferentes autores han sido detectados en por lo menos 3 estaciones sísmicas, monitoreando durante casi 7 años el campo Tres Vírgenes, determinando 125 microsismos; sus características hipocentrales se pueden observar en la Tabla A3 del Anexo A.

Las magnitudes  $M_d$  de los sismos seleccionados oscilan entre 0.3 y 2.5, mientras que la profundidad va desde 0.6 hasta los 11 km, la distinción de arribos de onda se realizó con RMS de 0.7 y hasta 0.01; en general los errores de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) son mayores a los 2 km para los sismos localizados fuera de la red local; mientras que para los localizados dentro de la red sismológica los errores fueron menores a 2 km.

### 2.3.5.3 Distribución en superficie y en profundidad de los sismos seleccionados

Recopilando los sismos detectados desde el 2003, los 125 sismos seleccionados para el análisis se distribuyeron partiendo de la zonificación de acuerdo a los antecedentes observados Rodríguez (2001), para posteriormente modificar y adaptar la partición con los nuevos datos sísmicos de acuerdo a los cambios en el arreglo de la malla sísmica; la precisión en la localización de los hipocentros puede variar, dentro de las zonas propuestas se dividieron los sismos locales dentro y fuera del campo geotérmico.

En la Figura 2.3.3 se muestra la distribución en superficie de los sismos mejor localizados; además se han representado los sistemas de fallas principales: La Virgen (Rancho La Virgen), La Cuesta (El Volcán), El viejo y el Cimarrón y El Partido, estructura con mayor actividad observada en el campo.

Los periodos de estudio son los siguientes:

1. Periodo 2003 a 2004
2. Periodo 2006
3. Periodo 2008
4. Periodo junio a diciembre del 2009

#### 1. Periodo 2003 a 2004

Durante el periodo en cuestión, Lermo (2004) logró observar que las localizaciones hipocentrales de los sismos, se relacionaban a los sistemas de las trazas correspondientes a las fallas La Virgen (Rancho La Virgen), La Cuesta (El Volcán), El Partido, El Viejo, El Cimarrón y El Partido, dando indicios de su movimiento y actividad aproximadamente desde el 2003 hasta la fecha, se observa que la actividad sísmica cercana al pozo inyector comienza a ser notoria en la falla El Partido, con un número de sismos asociados mayor a los demás sistemas.

Por último, durante cuatro meses (27 de septiembre al 23 de diciembre del 2004) nuevamente Lermo y cols., 2005, monitorearon la actividad sísmica asociada a la acidificación de los pozos LV-11 y LV-04, demostrando que la Falla La Cuesta o el Volcán fue la más activa, además relacionada directamente con las actividades de los pozos



mencionados anteriormente. Observó 37 sismos locales distribuidos en 3 zonas A, B y C (Figura 2.3.2).

- **Zona A:** en esta zona se localizan 11 sismos relacionados a la Falla El Volcán y ocurrieron en un periodo previo a la estimulación, los sismos relacionados a la etapa de estimulación son el 27,28 30, 32 y 35, los cuales se muestran en la Tabla A3 del Anexo A; sin embargo actualizando el modelo y programa de localización se adjudican directamente a la estimulación los sismos 35, 36 y 37, con magnitudes desde 0.2 a 1.9 grados.
- **Zona B:** se agrupan en la zona los sismos cercanos al pozo inyector LV-8, se relacionaron los sismos 37 y 38; sin embargo se relacionan probablemente por el tiempo de ocurrencia, a la inyección de fluidos durante la estimulación.
- **Zona C:** en forma dispersa se localizan principalmente el remanente de sismos durante el periodo de la estimulación y se encuentran relacionados directamente a la actividad de la falla La Virgen.

A través de esta distribución en zonas, se logró asociar la actividad sísmica con el proceso de estimulación acida en la Zona B, zona que agrupa los pozos en estimulación; por lo cual se infiere una relación entre la ocurrencia de sismos y la inyección de fluidos que participan en la estimulación.

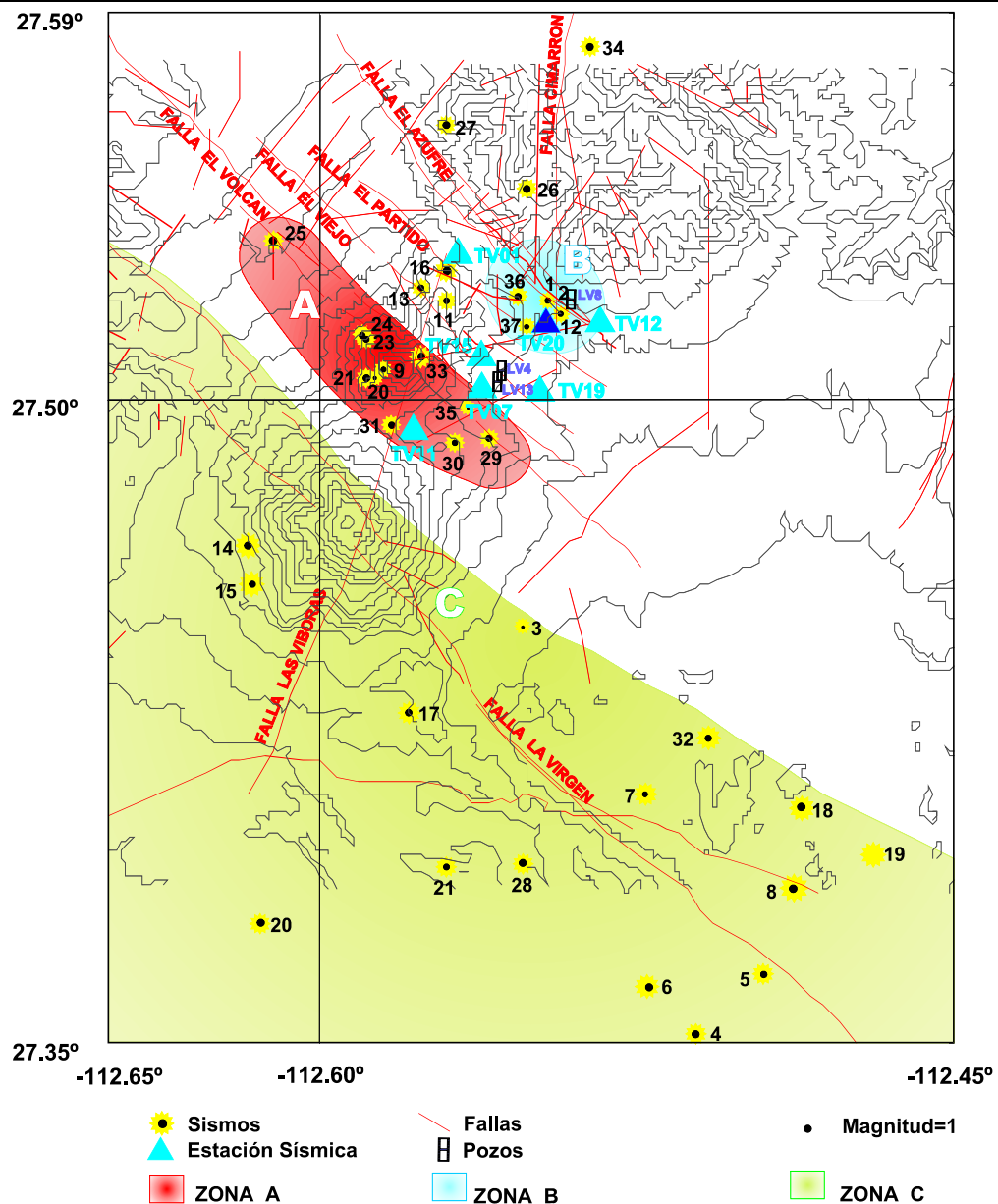


Figura 2.3.2. Distribución espacial de los sismos (Lermo y cols., 2005).

## 2. Periodo 2006

El año 2006 se considera como el periodo con menor número de sismos seleccionados, no obstante como se ha mencionado solo son analizados los sismos significativos del periodo, destaca la reactivación en la zona sur de la Falla La Virgen, donde en el mes de junio se incrementó cuantitativamente el numero de eventos (Lermo y cols., 2006); en la distribución espacial es importante señalar que en la zona sur del campo, se observó un enjambre de sismos asociados a la tectónica de la zona.

**3. Periodo 2008**

Siguiendo con los estudios ahora en el periodo 2008, Lermo y cols., 2008, observaron una continuidad en la actividad de las fallas La Virgen, La Cuesta (El Volcán) y El Partido, lo que permitió dar certidumbre de su actividad e información complementaria (rumbo y echado), al asociar gráficamente la distribución de los sismos en profundidad.

Durante este periodo se localizaron diversos sismos fuera de la red de monitoreo, en la zona paralela a la Falla la Virgen y a la Falla El Cimarrón con localizaciones solo estimativas, por el alto porcentaje de error en superficie y en profundidad; en estudios posteriores se confirmarían la activación de las fallas Cimarrón y Las Víboras, que presentan una dirección SE NW, y se presentaría un nuevo modelo estructural (Lermo *et al.* 2008), asociando la actividad sísmica a estas dos fallas y se obtendrían dos mecanismos focales. La actividad en la Falla El Cimarrón se asocia con la ocurrencia de cuatro sismos en sus cercanías; otra zona que también se reactivó se encuentra al sur de la Falla La Virgen, no es precisamente la falla La Virgen, ya que en el 2006 tuvo un reactivación y su distribución fue diferente (Lermo y cols., 2006). Estudios realizados por López (1993), justifican la activación de la sismicidad ha esta falla, debido a que señala su ubicación paralela a la falla La Virgen.

**4. Periodo junio a diciembre del 2009**

Durante el periodo de junio a diciembre se monitorea por segunda ocasión la estimulación de un pozo productor, que de acuerdo a la distribución en las localización la zona más permeable con dirección al pozo provienen de la falla La Cuesta (El Volcán) al tener mayor cantidad de sismos locales asociados en el periodo, el resto de los hipocentros se localizan en la periferia de los pozos.

La distribución espacial del total de los sismos seleccionados desde el 2003 a 2009, se muestra en la Figura 2.3.3, se observa una acumulación alrededor del volcán la Virgen, la falla La Cuesta y las fallas El Viejo I y II; sin embargo si ahora observamos esta distribución en profundidad (Figura 2.3.4) los sismos se concentran en dos zonas, una debajo del volcán La Virgen, y la otra puede ser asociada solamente a la Falla La Cuesta (El Volcán), tomando como consideración una forma lítrica se proyecta el posible echado y rumbo, además se

### **61 2.3 Campo Tres Vírgenes**

---

muestra en forma vertical la Falla La Virgen, y El Partido, esta última junto con el pozo inyector IL-08 y los pozos productores LV-11, LV-13 no presentan sismos asociados.

La zona tectónica de las Tres Vírgenes es de alta actividad, como podemos observar en la Figura 2.3.6; el 64 % del total de eventos está asociado a la tectónica, independientemente de la explotación en el campo geotérmico, en la Figura 2.3.3 se observan 3 cuantiosas acumulaciones asociadas al tectonismo local al norte en la falla El Cimarrón, y al sur en el Volcán La Virgen y Falla La Virgen, la estructura de falla más extensa en la región.

Los porcentajes en relación con la distribución de sismos en las zonas de explotación A y B (Figura 2.3.5); nos indica que el 36 % de la sismicidad está localizada dentro del campo geotérmico (Figura 2.3.6), cubriendo los pozos inyectores y productores, en mayor porcentaje los sismos son asociados a la cuantiosa actividad tectónica, confirmando la alta actividad tectónica en la zona, además de asociarse en la traza de las fallas principales descritas con anterioridad.

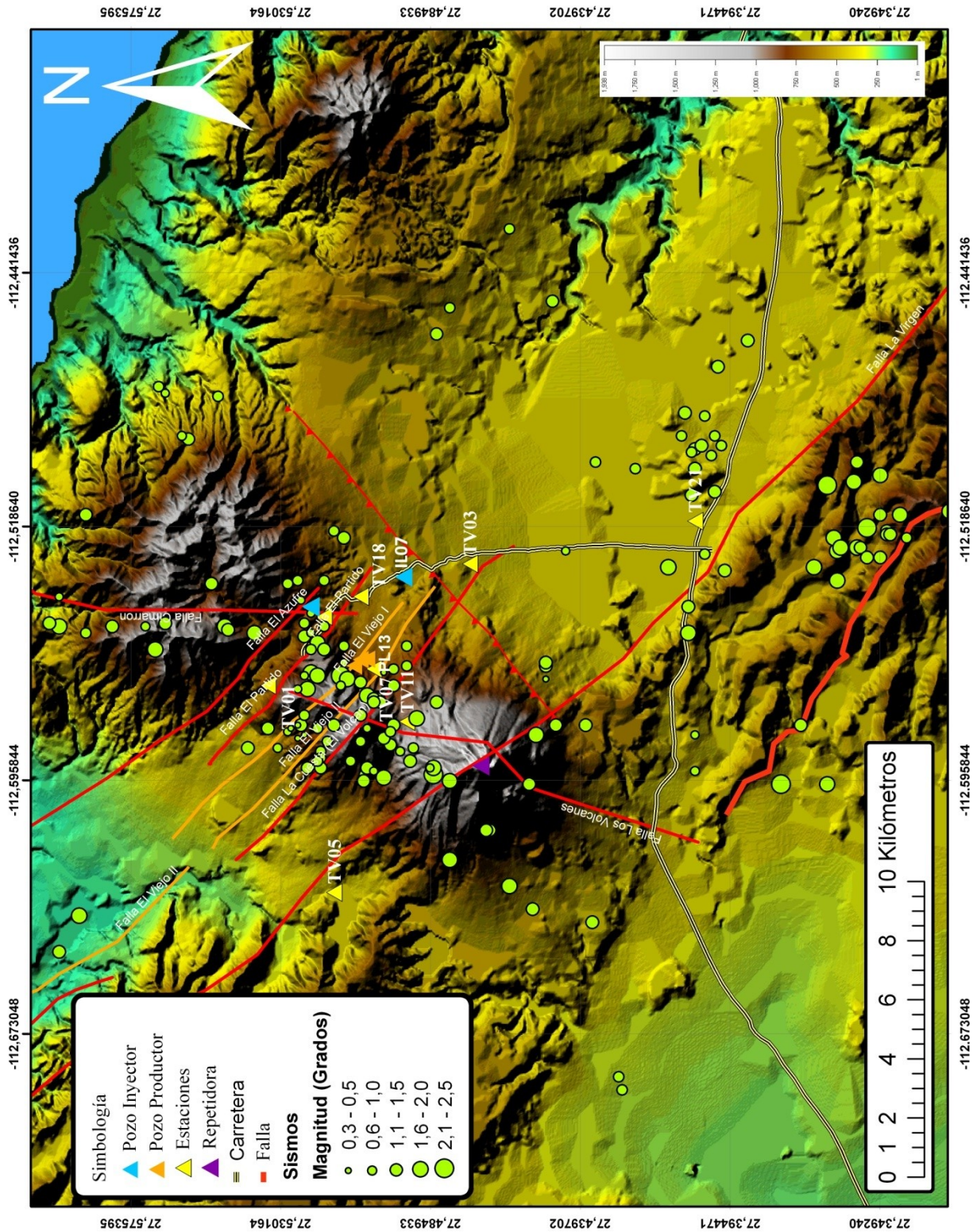


Figura 2.3.3. Distribución espacial de los sismos en el campo Tres Vírgenes, 2004 a 2009.



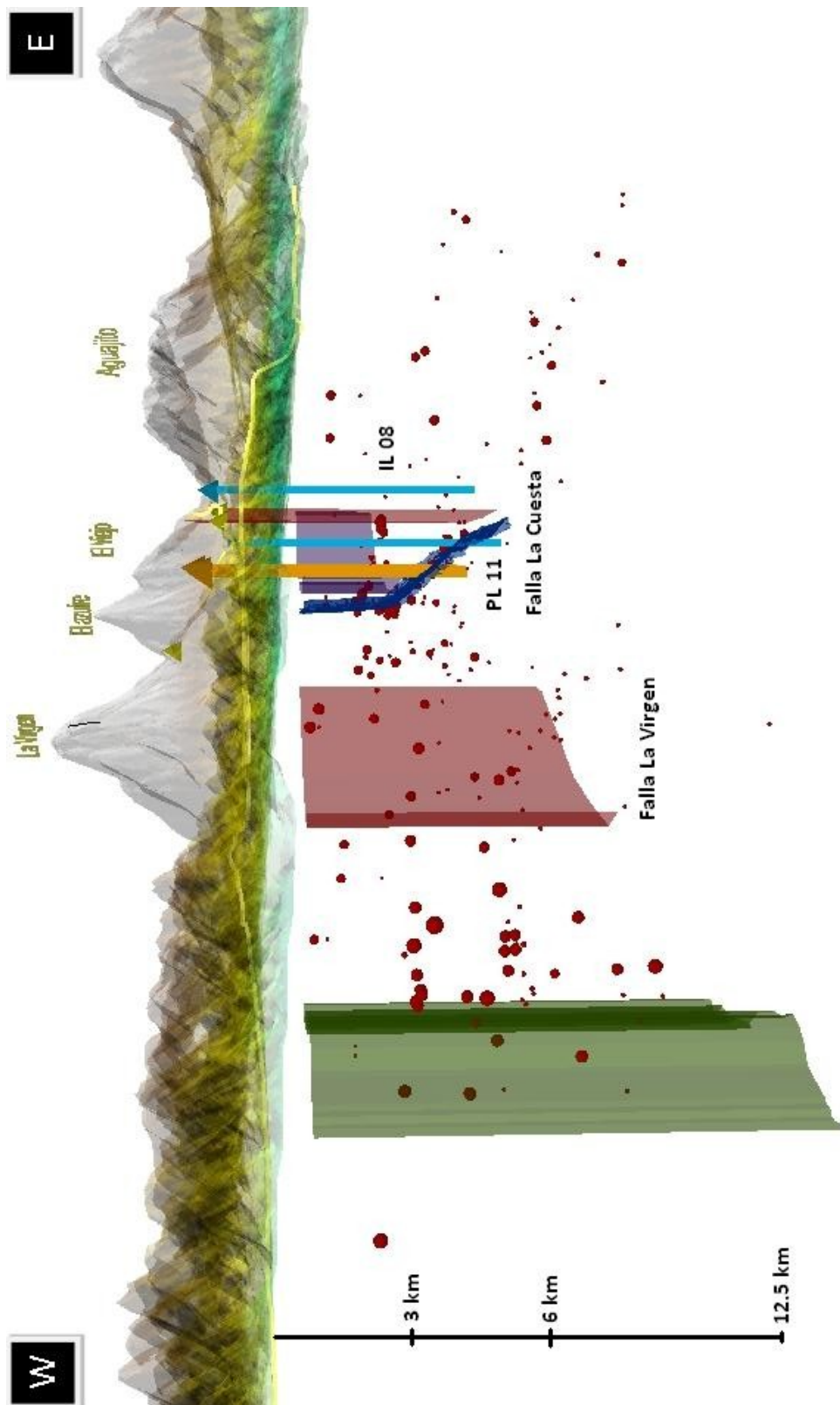
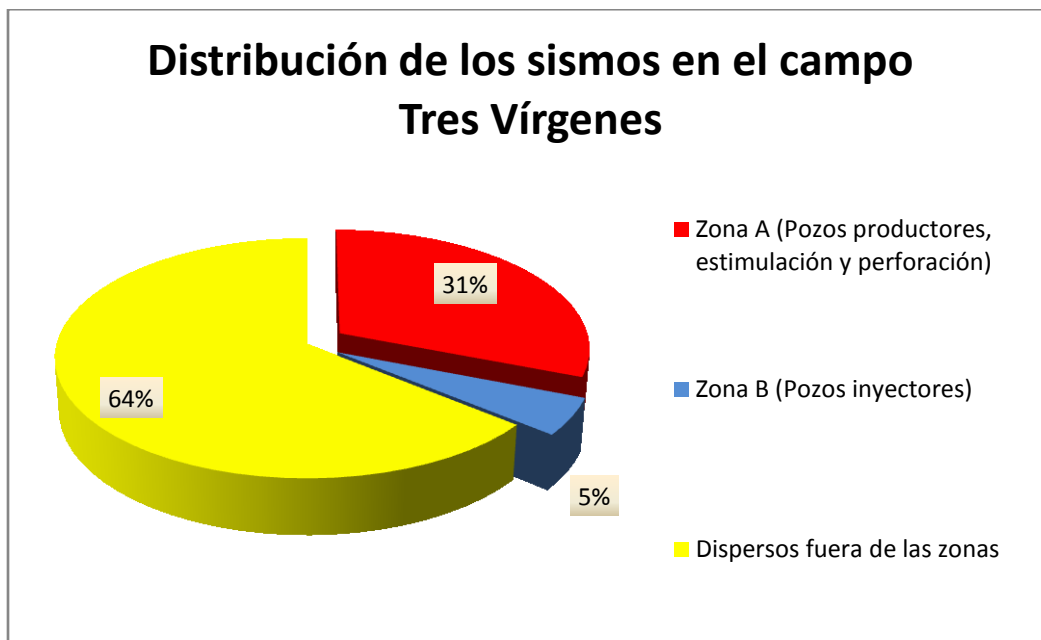
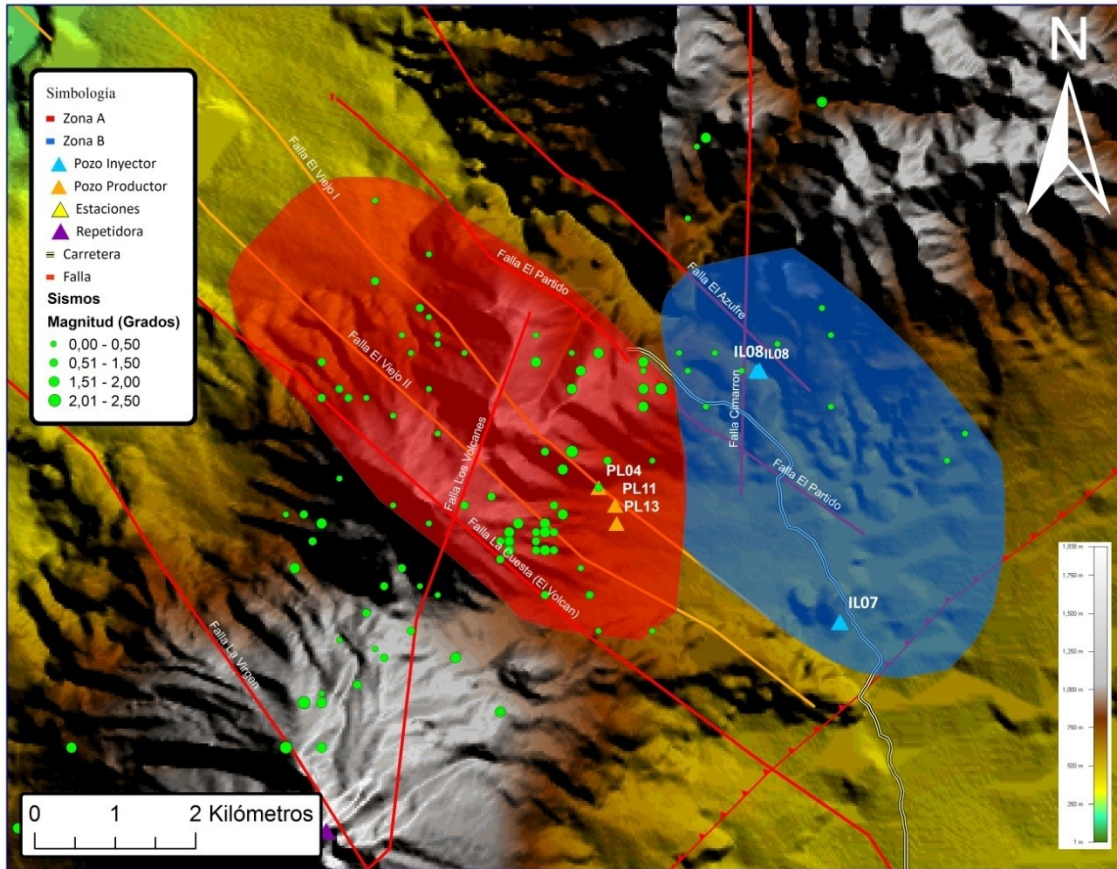
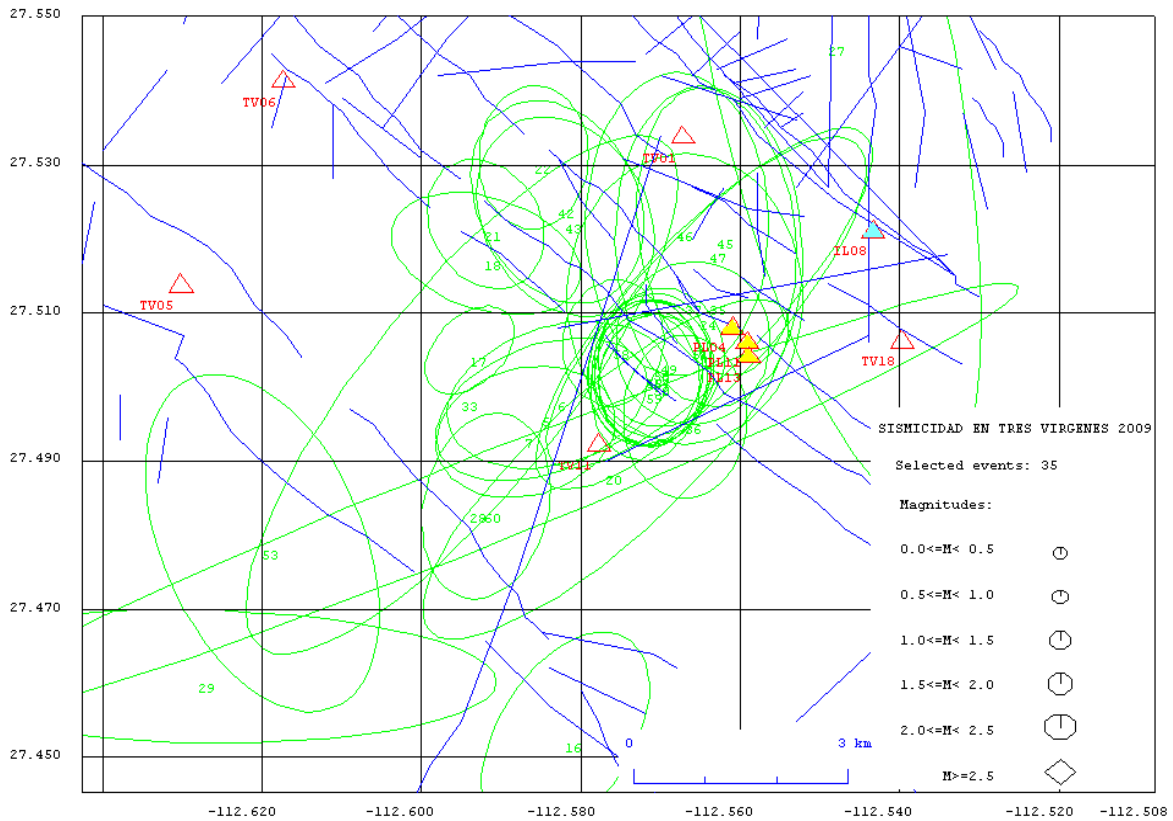


Figura 2.3.4. Perfil sísmico E-W; se observan los sismos en diferentes tamaños de acuerdo a su magnitud (esferas rojas), Falla La Virgen (plano verde), Falla La Cuesta (plano azul), pozos inyectoros (líneas azules) y productores (líneas naranjas).



Figuras 2.3.5 y 2.3.6. Zonificación del campo Tres Vírgenes; vista en planta figura superior y distribución en porcentaje de sismos en las diferentes zonas figura inferior.

## 65 2.3 Campo Tres Vírgenes



**Figura 2.3.7 Elipses de error en la determinación de los epicentros para el periodo 2009 (elipses verdes) (Lermo y cols., 2009).**

### 2.3.6 Sismicidad durante la perforación, estimulación y las pruebas de producción en el pozo LV-06

En el año 2009 se realizó la perforación del último pozo productor en el campo geotérmico (LV-06); considerando como objetivo traspasar la Falla La Cuesta. El 25 junio del 2009 comienza la perforación y concluye con las labores de estimulación en el pozo el 24 de diciembre del mismo año, se asocian al menos 30 eventos a los trabajos de perforación y estimulación en el periodo y se observa una secuencia de activación con la ocurrencia de sismos en la Figura 2.3.8, donde se logró asociar los eventos e interpretar el posible buzamiento de la Falla La Cuesta, debido los diversos cambios de esfuerzos que generaron la microsismicidad. La sismicidad agrupada cronológicamente, se correlaciona con los tiempos de arribo de la barrena a las profundidades objetivo, concluyendo con la profundidad total de 2500 m.



El primer indicador de actividad se observó desde el inicio de la perforación, asociando un evento el 20 de junio, posteriormente dos eventos más en el mes de julio (88 y 89, Tabla A3 Anexo A), cuatro más en octubre y noviembre (90, 100, 101, 102) en las zonas más profundas de la falla, concluyendo con la perforación a finales del mes de diciembre del 2009, donde se observó nuevamente actividad en lo más profundo (16 de diciembre, 110, 111 y 112), a la mitad de la perforación (19 de diciembre, 113 y 112) y el día 25 de diciembre coinciden dos sucesos importantes; uno la fecha del enfriamiento y el segundo la actividad en la vecindad del pozo donde finalizó la perforación y se alcanzó la profundidad del objetivo. Finalmente se concluyó con la limpieza del pozo mediante el bombeo de baches y la prueba de flujo mediante la inyección de agua al yacimiento (sismos 117, 118, 119, 120 y 121), finalizando el 26 de diciembre con el sismo numero 122.

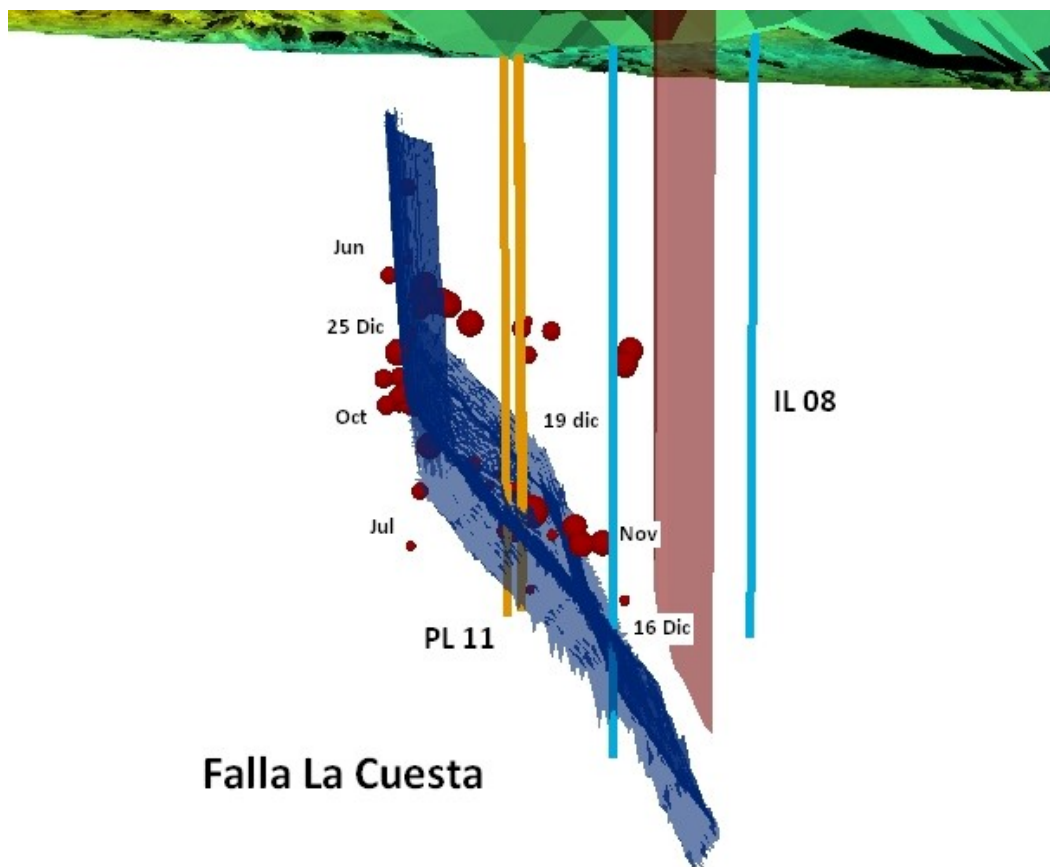


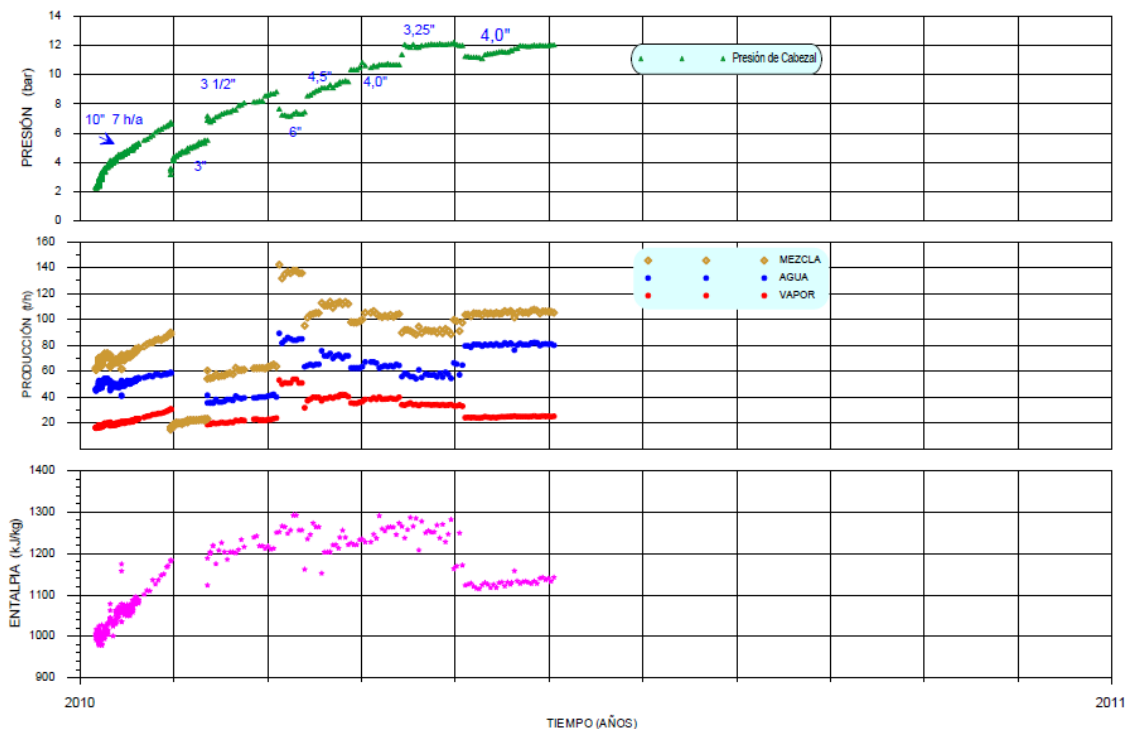
Figura 2.3.8. Perfil sísmico E-W con la proyección de la Falla La Cuesta y el pozo PL-11; representando el posible buzamiento de la Falla La Cuesta (superficie azul), Falla Las Víboras (superficie roja), pozo perforado PL11 y en producción al 2009 (líneas naranjas), pozos inyectores (líneas azules), sismicidad 2004-2009 (esferas rojas).

### 67 2.3 Campo Tres Vírgenes

---

Los trabajos continuaron durante seis meses más hasta la entrega del pozo, después de llevar a cabo las respectivas pruebas de producción en Junio del 2010. El monitoreo sísmico por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM, continuó a lo largo del tiempo de prueba, desde enero hasta finales de abril en el 2010, donde se observaron aproximadamente 260 eventos locales, relacionados a zonas cercanas al pozo perforado LV-06 (Figura 2.3.10).

Un análisis comparativo y cronológico entre las operaciones (programa de perforación proporcionado por CFE, Figura 2.3.9 y Tabla 2.3.3) y el número de sismos (Figura 2.3.10); el día 27/12/2009, se incrementó el número de sismos a siete, fecha que indica el comienzo de la inyección o ingreso del ácido en la vecindad del pozo, periodo conocido como proceso de acidificación; el 06/01/2010, inicia el proceso de inducción o periodo de calentamiento en el pozo, tiempo en el cual se mantiene el pozo produciendo a gasto constante a través de una válvula regulada, hasta alcanzar las condiciones de presión y temperatura óptimas en las tuberías de producción, a inicios de febrero se da comienzo con las diferentes pruebas de producción; el día 09/03/2010, se observó la coincidencia más notoria cuando se incrementa el número de sismos y el gasto de producción en la prueba, contabilizando la mayor cantidad de sismos asociados (58 sismos, Figura 2.3.10), lo que refiere una expansión en el sistema roca-fluido dentro del yacimiento debido a la producción, considerando un daño a la formación estimado de  $-1.54$ , que facilitaría el flujo de vapor hacia el intervalo disparado. Al realizar el cambio de la placa de orificio de 3.5'' a 4.5'', el 12/04/2010, se alcanzó una producción de 60 ton/h y se asociaron nuevamente un incremento de sismos a las pruebas de producción (11 sismos locales), hasta el final de las respectivas pruebas el 23/04/2010, donde se cuantificaron diez eventos. Es importante señalar que los eventos asociados a las actividades fueron detectados primeramente en la estación sísmica más cercana al pozo en perforación (estación TV-01), además los eventos presentan características similares en la diferencia del arribo de ondas P y S (menores a los 3 segundos), lo que determina su proximidad a la estación y en la inmediaciones al pozo LV-06.



**Figura 2.3.9. Evolución pruebas de producción del pozo LV-06 (Informe final de perforación y estimulación ácida del pozo LV-06 TVB-RE-03-2010).**

En la Tabla 2.3.3 se presentan las fechas del inicio de las pruebas de producción con su respectiva presión en la cabeza del pozo ( $P_c$ ), gasto de agua ( $Q_a$ ), gasto de vapor ( $Q_v$ ), gasto de la mezcla (mezcla), porcentaje de calidad, entalpia y la condición de flujo a un diámetro en la placa de orificio determinado (condición).

**Tabla 2.3.3. Evolución pruebas de producción del pozo LV-06 (Informe final de perforación y estimulación ácida del pozo LV-06, TVB-RE-03-2010)**

Fecha	Pc (bar)	Qa (t/h)	Qv (t/h)	Mezcla (t/h)	Calidad %	Entalpia (KJ/Kg)	Condición
09/03/2010	8.8	44.4	19.2	64		1250	Fluye por 3.5"
18/03/2010	7.31	94.5	41.5	136	30.5	1256	Descarga 6"
23/03/2010	8.89	79.4	32.2	112		1264	Fluye por 4.5"
09/04/2010	10.8	70.15	29.3	105		1234	Fluye por 4"
06/05/2010	12.07	64.1	25.4	89.6	28.4	1238	Fluye por 3.5"
10/06/2010	11.9	105	24.7	130	19	1130	Fluye por 4"

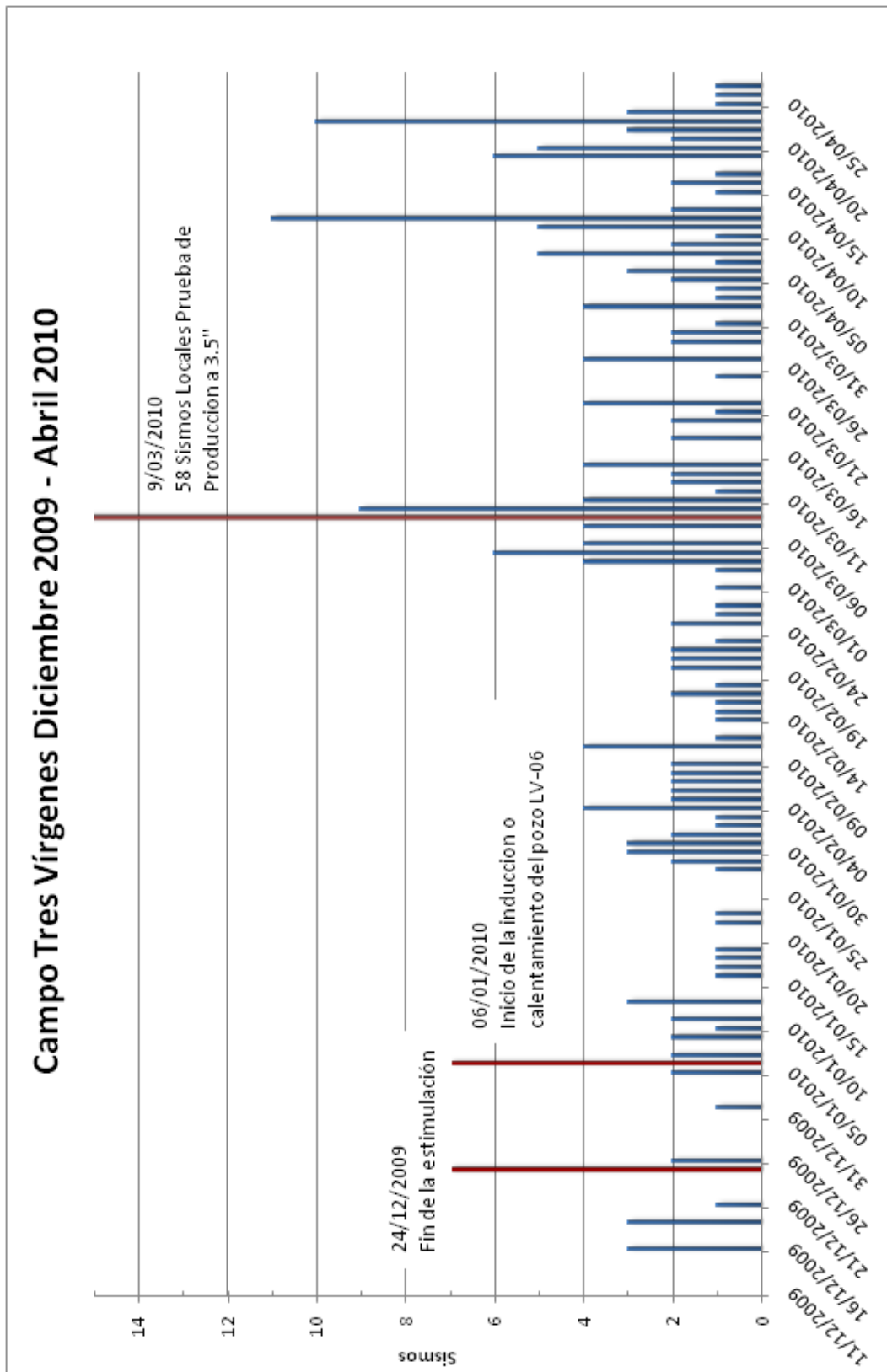


Figura 2.3.10. Registro de sismos locales detectados por la estación TV-01; durante el mes de diciembre del 2009 hasta abril del 2010.

## 2.4 Campo Cerro Prieto

### 2.4.1 Antecedentes

El campo geotérmico Cerro Prieto (CGCP) se encuentra en el estado de Baja California Norte, 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali. La zona geotérmica del Valle de Mexicali, se localiza dentro de la cuenca del *Salton*, que abarca desde el *Salton Sea* en la porción sur del estado de California, Estados Unidos, hasta el Golfo de California y forma parte del sistema tectónico de San Andrés, formado por fallas transcurrentes con desplazamiento normales, de dirección general NO-SE.

El CGCP empezó a explotarse comercialmente en 1973, a partir de esta fecha se ha extraído vapor geotérmico mediante las diferentes centrales generadoras. Actualmente se tiene una capacidad instalada de 720 MW y se extraen aproximadamente 5800 t/h de vapor para cumplir la demanda de las centrales. Hay un total de 353 pozos perforados, de los cuales alrededor de 170 se encuentran integrados al proceso productivo.

### 2.4.2 Geología y tectónica

Tectónicamente, Baja California se ubica en la vecindad de la frontera entre las placas tectónicas del Pacífico y Norte América; la interacción de estas placas ha dado origen a un conjunto de fallas activas, de las cuales las fallas Imperial y Cerro Prieto son las más importantes, por constituir un segmento de la frontera entre estas placas (Figura 2.4.1). Existen fallas subsidiarias hacia el oeste de estas fallas principales, constituyendo así un complejo sistema de fallas en el estado de Baja California. Los niveles de actividad sísmica de estas fallas varían en intervalos que abarcan desde pequeños micro sismos hasta sismos de mayor magnitud y considerable potencial dañino.

En lo que a las fallas se refiere, las más importantes en la zona del campo geotérmico son: La Cucupá, Cerro Prieto, Michoacán e Imperial (Figura 2.4.1, Aguilar, 2006). La Falla Cerro Prieto (FCP) es de rumbo NE-SO, con echado al SO de 75° a 80° y se extiende desde el centro de dispersión de Cerro Prieto hasta la Cuenca de Wagner. La Falla Michoacán pertenece al mismo sistema de fallas Cerro Prieto, de rumbo NO-SE y echado variable al SE; esta estructura y la falla Cerro Prieto forman un *horst* o bloque levantado que se acuña al sur (Figura 2.4.2). En este

## 71 2.4 Campo Cerro Prieto

bloque se aloja el sector del CGCP conocido como Cerro Prieto I. El sistema de fallas H, de rumbo NE-SO y echado al SE de  $45^\circ$  a  $65^\circ$ , es producto de los esfuerzos de tipo dextral entre la Falla Imperial y el sistema de Fallas Cerro Prieto.

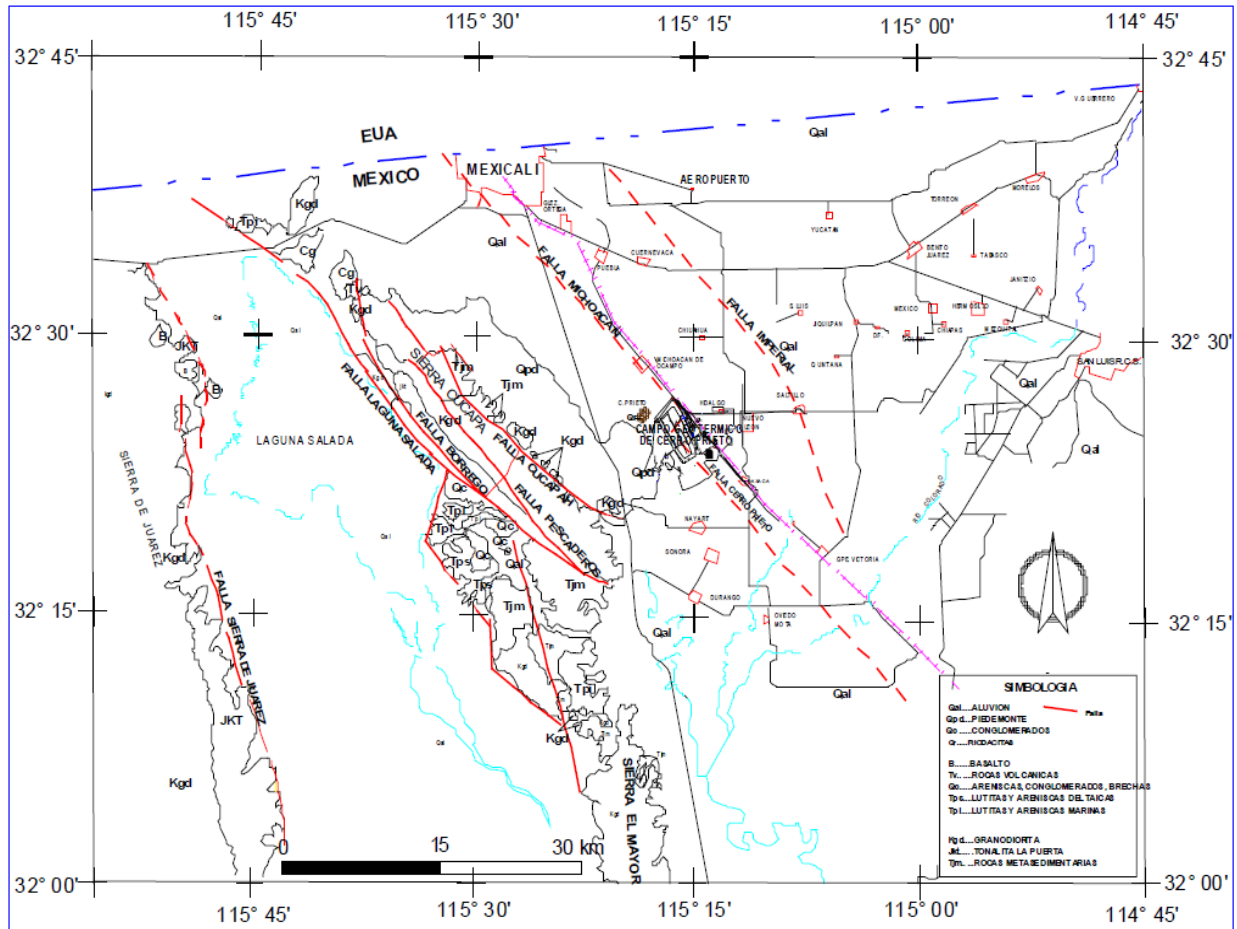


Figura 2.4.1. Distribución del sistema de fallas San Andrés; formada por fallas transcurrentes con desplazamiento normal y dirección NO-SE (Herrera, 2006).

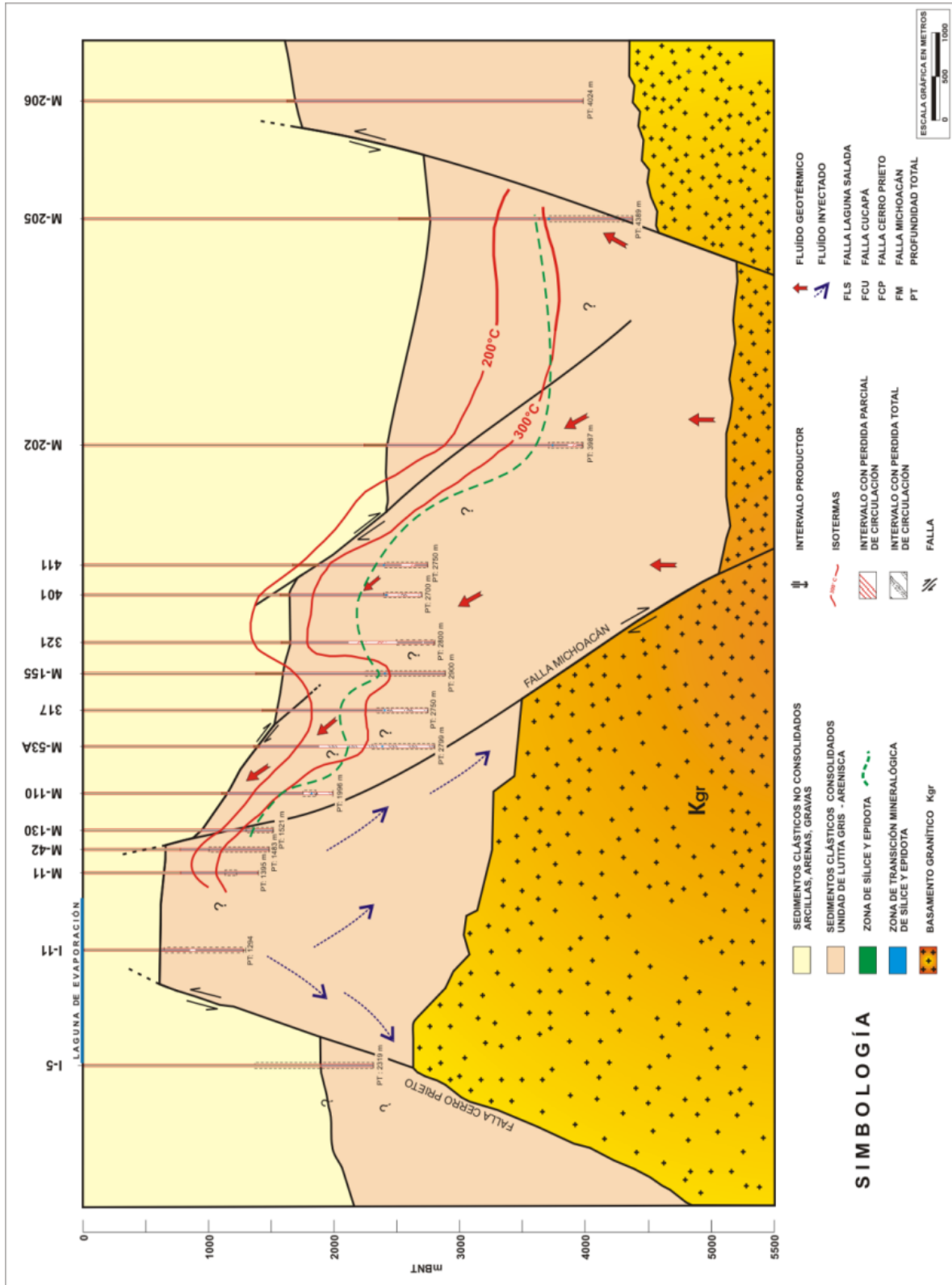


Figura 2.4.2. Perfil geológico con la estratigrafía en la región de Cerro Prieto (Aguilar, 2009).

### 2.4.3 Estudios sismológicos

En el aspecto sísmico del CGCP Fabriol y Munguía (1997) estudiaron la actividad sísmica desde 1994 hasta 1995; mediante una red compuesta por cuatro estaciones fijas y dos temporales, relacionando solamente un evento local con las actividades de explotación en el campo.

Rebollar y cols., 2003 presentan un análisis que inició en abril de 1998 a diciembre de 2001, a través de 21 estaciones sismológicas, utilizando un modelo de velocidades de onda P unidimensional de capas planas, los sismos fueron localizados con más de cinco registros agrupados en tres diferentes zonas: 1) Sismicidad asociada al enjambre de noviembre de 2000; 2) Sismicidad asociada a un segundo enjambre en febrero del 2001; y 3) Sismicidad asociada a la actividad de los pozos inyectores y productores del CGCP. Esta sismicidad se encuentra asociada a su vez con la falla normal denominada como falla H (Rebollar y cols., 2003) o falla Morelia (Suárez-Vidal y cols., 2007), ya que los epicentros de esta zona se encuentran alrededor de esta falla; un estudio detallado de los temblores moderados ocurridos el 1° de junio y 10 de septiembre de 1999 ( $M_w = 4.8$ ) y 17 sismos de menor magnitud (entre 2.2 a 4.4), registrados con una red acelerográfica instalada dentro del CGCP desde 1994 a 1999, muestran este mismo comportamiento (González y cols., 2001).

Por otro lado, Rebollar y cols., 2003, mencionan que la sismicidad asociada, tanto al primer enjambre (noviembre 2000) como el segundo (febrero 2001), están relacionadas con la continuación de la ruptura de la falla de transcurrencia Cerro Prieto.; también se puede asociar a la continuación de la ruptura de esta misma falla, al enjambre ocurrido en febrero del 2009, localizado por la Red Sísmica del Noroeste de México (Red sísmica operada por el Centro de Investigación Científica y de Educación superior de Ensenada, CICESE), cuyos epicentros muestran la misma trayectoria, como se pueden observar en la Figura 2.4.3.



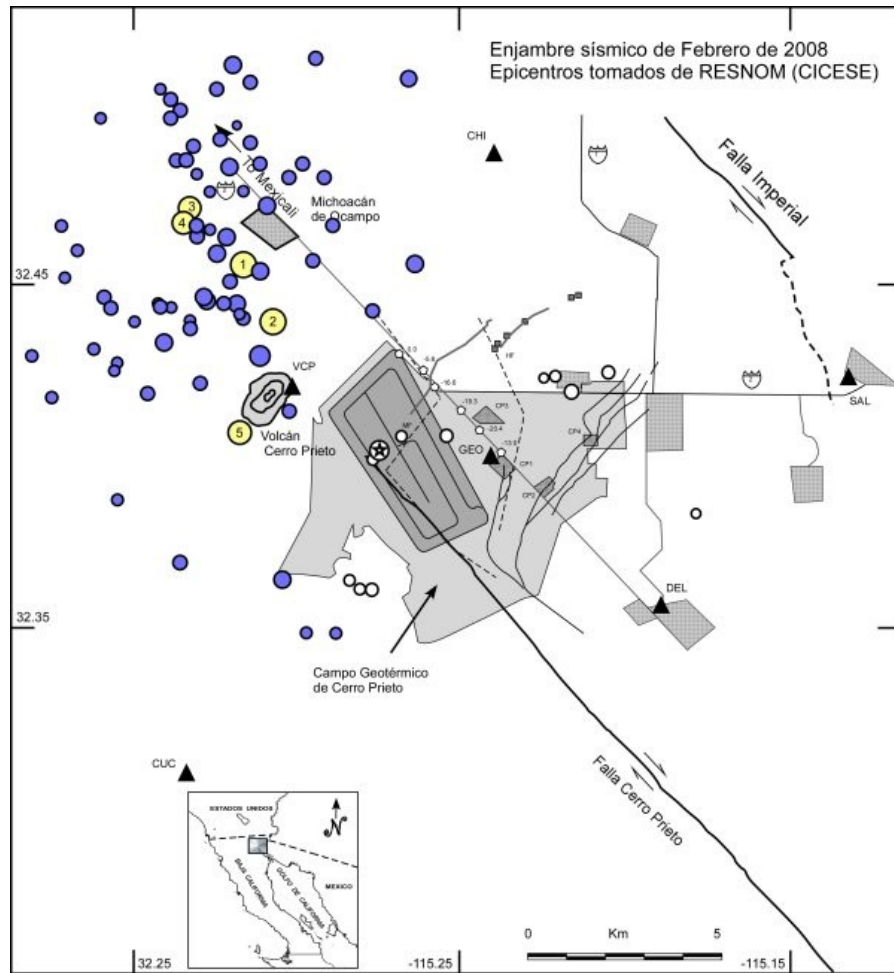


Figura 2.4.3. Distribución espacial de la sismicidad dentro y fuera del campo geotérmico de Cerro Prieto (Boletín RESNOM, febrero 2008).

## 2.4.4 Monitoreo sísmico

### 2.4.4.1 Estaciones sismológicas

La red de monitoreo sísmico utilizada por Fabriol y Munguía (1997), está compuesta por cuatro estaciones instaladas temporalmente y adicionalmente se utilizaron la red regional fija, Red de Monitoreo Sísmico del Noroeste de México (RESNOM), instalada y operando por parte del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

Rebollar y cols., 2003 monitoreo a través de una de las redes más completas hasta la actualidad en la región geotérmica, con 21 sismógrafos que van desde periodo corto hasta banda ancha, *Sprengnether*, *Kinematics K2*, *Guralps GUS* y estaciones de tipo GEO.

## 2.4.5 Análisis de la actividad sísmica

### 2.4.5.1 Modelo de Velocidades

El modelo de velocidades considerado en el estudio y utilizado por Rebollar y cols., 2003, se observa en la Tabla 2.4.2.

**Tabla 2.4.2. Modelo de velocidades en el campo Cerro Prieto (Rebollar y cols., 2003).**

<b>Velocidad Vp (km/s)</b>	<b>Profundidad (km)</b>
<b>1.7</b>	<b>0.0</b>
<b>2.0</b>	<b>0.7</b>
<b>2.3</b>	<b>1.0</b>
<b>2.6</b>	<b>2.0</b>
<b>3</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>4.2</b>
<b>6.3</b>	<b>10</b>

### 2.4.5.2 Localización hipocentral

Dentro de la localización hipocentral realizada por Fabriol y Munguía (1997), se utilizaron 148 sismos locales de alrededor de 408 señales observadas, con magnitudes de duración desde 0.5 hasta 4.6 y profundidades entre 1.5 y 4 km, mientras que Rebollar (2003), restringió su selección de desde el 2000 al 2001, en 232 sismos locales, obteniendo profundidades de 3 a 12 km, lo que significó la mayor profundidad encontrada en la localización dentro del campo y magnitudes entre -0.3 y 3.5.

En forma comparativa fueron obtenidos los eventos registrados por la RESNOM; sin embargo no se logró observar relación alguna, debida principalmente a que la red se encuentra fuera del área de estudio.

### 2.4.5.3 Distribución en superficie y en profundidad de los sismos seleccionados

La distribución espacial de los sismos localizados por Fabriol y Munguía en el 1997, se observa en la parte superior (Figura 2.4.5.a.), mientras que los eventos localizados por Rebollar y cols., 2003, se observan en la parte inferior (Figura 2.4.5.b.).

Como se ha mencionado los estudios realizados por Rebollar y cols., 2003, relacionaron espacialmente la ocurrencia de tres enjambres sísmicos en diferentes periodos de estudio, los cuales le sirvieron para realizar una zonificación dividida también en tres zonas. La Zona A cubriendo la franja sur de la laguna de evaporación y el polígono de producción, Zona B agrupando los eventos observados durante el mes de febrero en el 2001, en la franja norte de la laguna alcanzando los pozos inyectoros principales del campo, finalmente la Zona C agrupa los sismos cercanos al volcán Cerro Prieto, ubicados al noroeste del campo en el mes de noviembre del 2000.

Para este estudio se zonificó de acuerdo en zonas similares a los demás campos geotérmicos, Zona A agrupando los pozos inyectoros en el campo que han sido desarrollados desde 1997 hasta el 2009, y no fueron considerados en otros estudios; la Zona B que en espacio agrupa a más de 200 pozos productores en la zona conocida como Polígono de Producción, y la Zona C con los eventos dispersos ubicados fuera de las zonas A y B, asociados principalmente a la actividad tectónica regional.

Finalmente en la comparación de los porcentajes de distribución, se buscó considerar la mayor cantidad de sismos localizados por los autores de los estudios anteriormente mencionados, logrando agrupar 45 % de los eventos dentro del campo geotérmico, 55 % disperso y fuera del campo (Figura 2.4.7); por lo tanto el análisis señala que la zona de explotación concentran el 45 % de eventos, lo que sugiere que los eventos han sido inducidos por las operaciones de inyección o producción, y por consecuente activación en la fallas colindante (Falla H).

En la distribución en profundidad se adicionaron los cortes de perfil trazados por Fabriol y Munguía (1997) y Rebollar (2003), representados en las Figuras 2.4.8 y 2.4.9; en los perfiles destaca la ubicación de los pozos inyectoros y la profundidad total desarrollada, en ambos perfiles se observan un par de eventos dispersos en la traza de los pozos inyectoros, Fabriol y Munguía proyectaron una línea base de color negro que indica la mayor profundidad alcanzada por los pozos inyectoros; no obstante la mayor acumulación de sismicidad se presenta en el intervalo de 4 a 6 km, en el basamento granítico a 1.5 km por debajo de la máxima profundidad alcanzada por los pozos inyectoros.

## 77 2.4 Campo Cerro Prieto

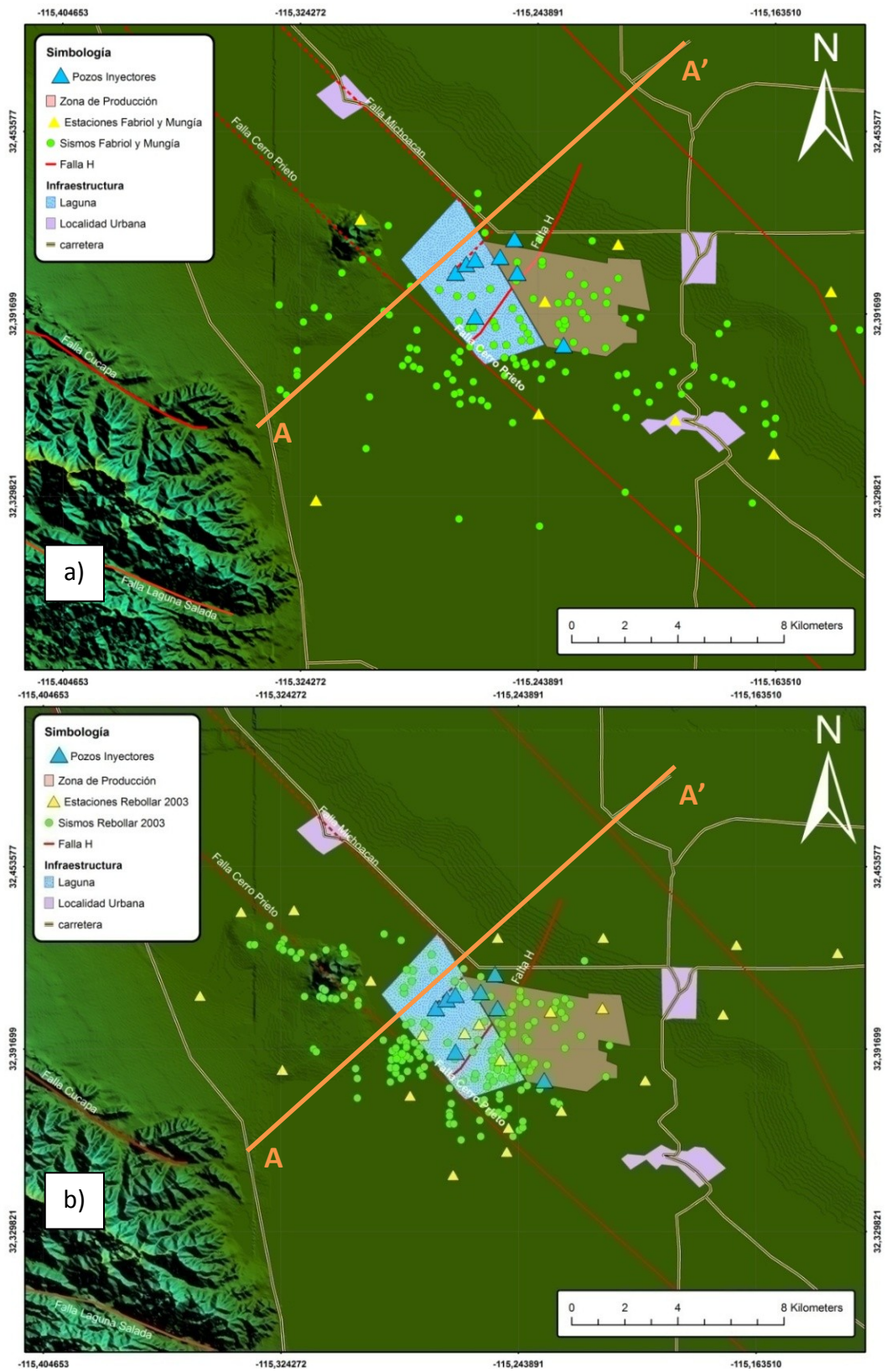
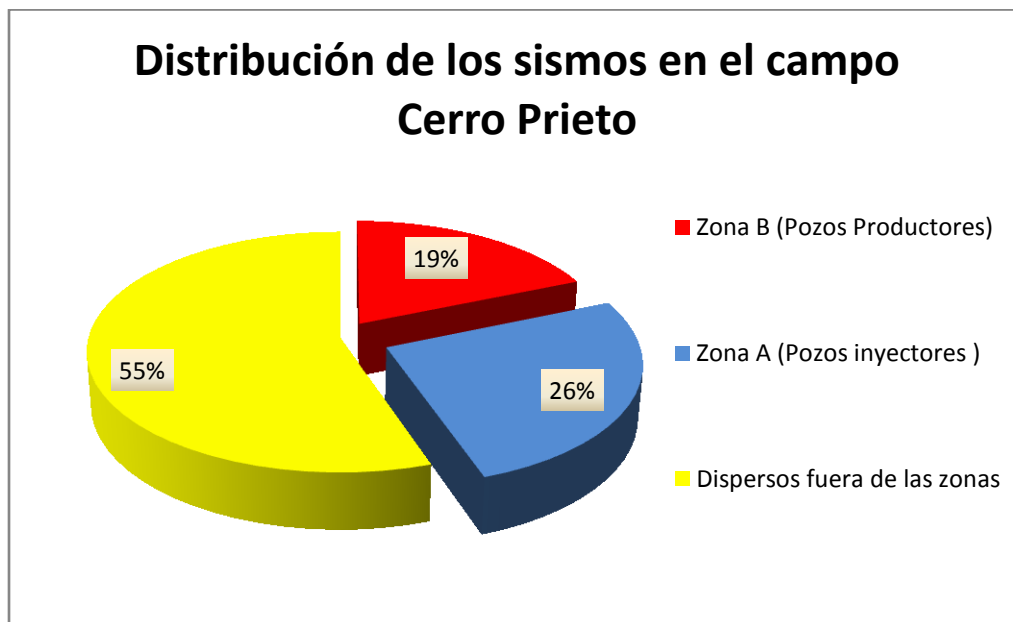
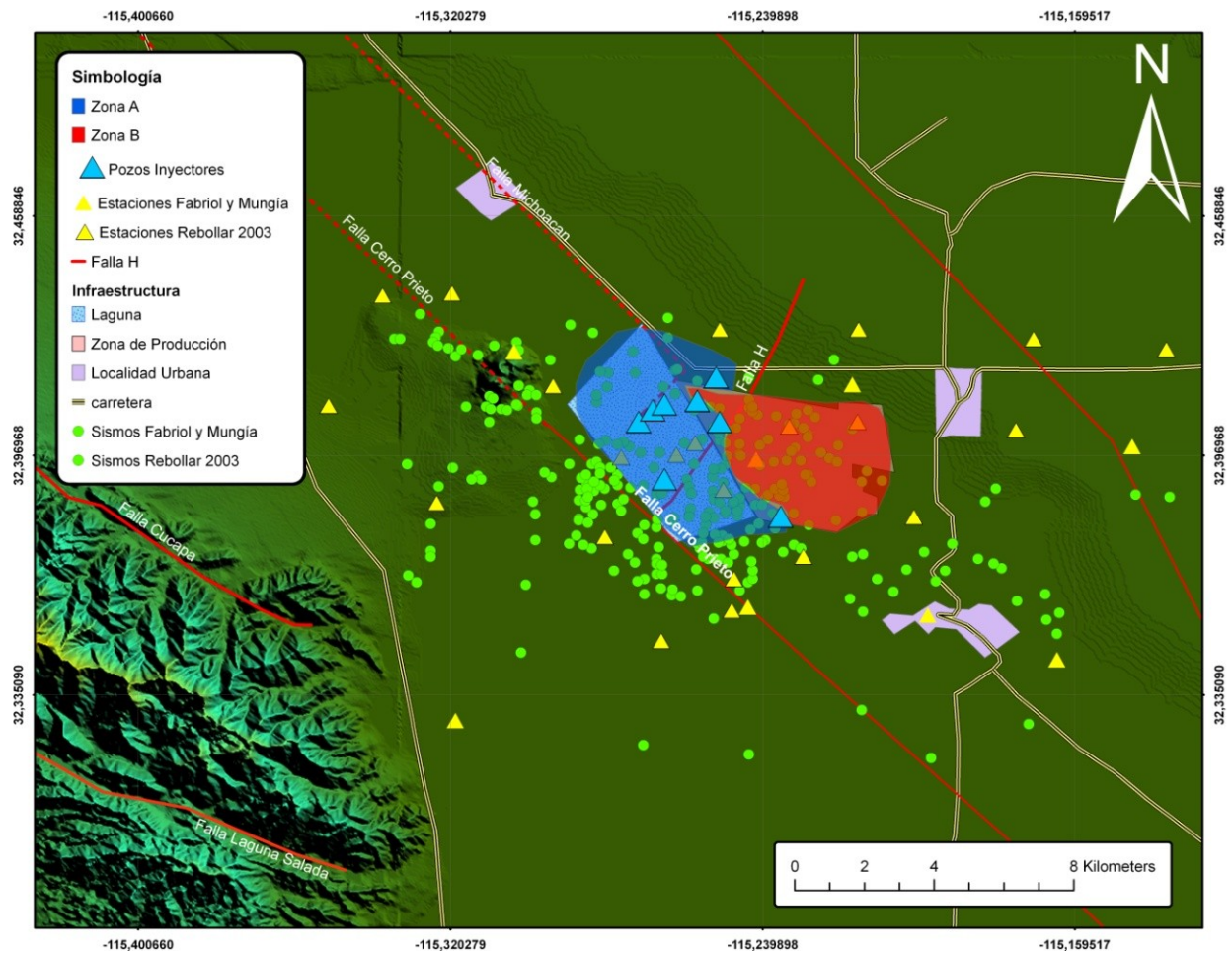


Figura 2.4.5. Mapa de distribución sísmica del campo Cerro Prieto; a) localización obtenida por Fabriol y Munguía (1997), b) localización obtenida por Rebollar 2003; Perfil sísmico A –A' (línea de color naranja).

## 2.4 Campo Cerro Prieto 78



Figuras 2.4.6 y 2.4.7. Zonificación del CGCP; vista en planta figura superior y porcentaje de distribución de los sismos en las zonas correspondientes figura inferior.

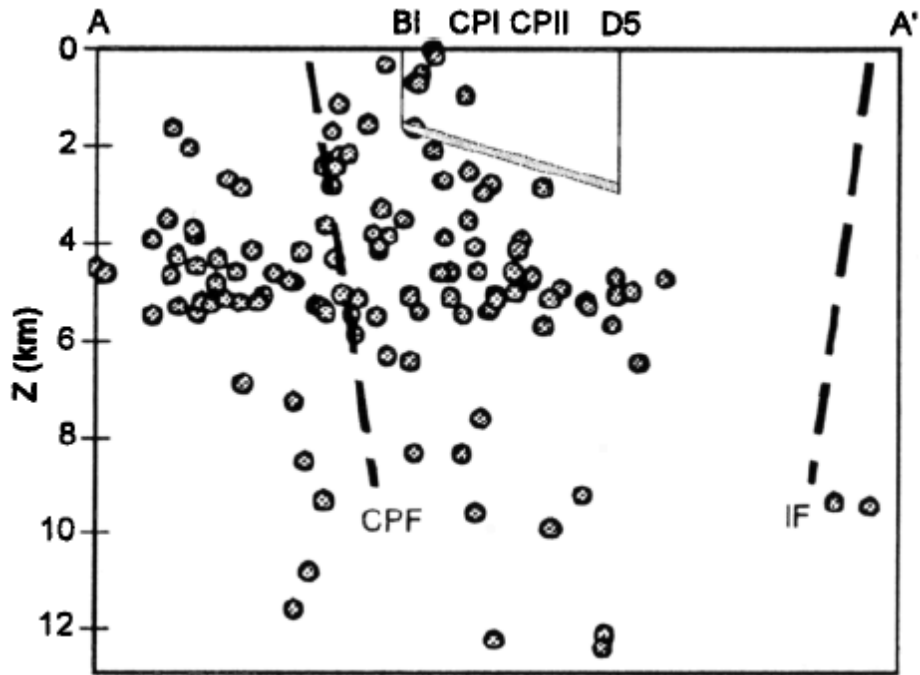


Figura 2.4.8. Perfil sísmico SW-NE (A – A'); Falla Cerro Prieto (CPF), Falla Imperial (IF), sismos (círculos negros), línea gris vertical es la profundidad alcanzada por los pozos hasta el año 1995 (Fabriol y Munguía 1997).

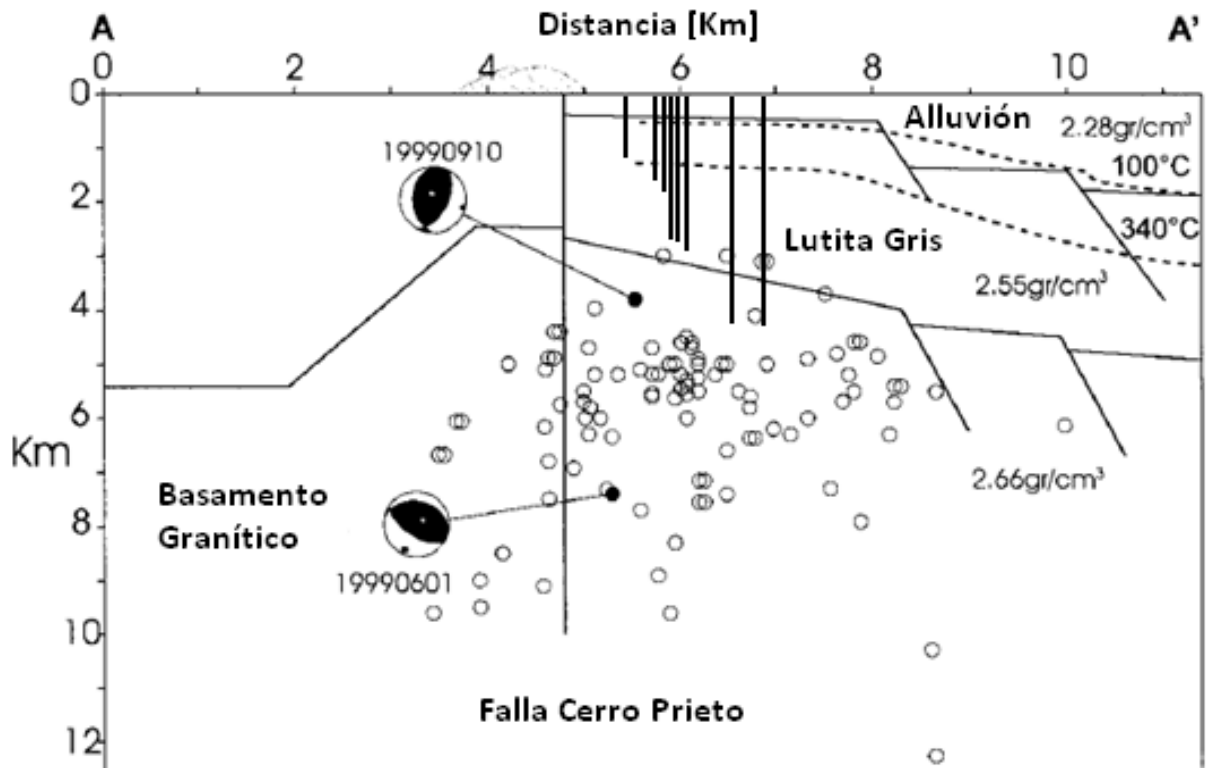


Figura 2.4.9. Perfil sísmico SW-NE (A – A'); sismos (círculos negros), pozos inyectoros (líneas verticales de color negro) (modificado de Rebollar y cols., 2003).



### 2.4.6 Relación con las operaciones de campo

Respecto a las operaciones de campo Fabriol y Munguía (1997) correlacionaron el sismo ocurrido el 5 de enero de 1995, con un incremento en el gasto de inyección por gravedad en el pozo 303, el 11 de enero, seis días después del incremento en el gasto se observó nuevamente un sismo ( $M_d=4.1$ ), a un kilometro de profundidad del intervalo disparado, nuevamente los eventos sísmicos fueron asociados al aumento en el gasto de inyección, debido quizás a la alta permeabilidad en el pozo 303, y la microsismicidad un indicador del posiblemente fracturamiento en la vecindad del pozo. En la Figura 2.4.10 se muestra con la relación entre el incremento de inyección y la ocurrencia del sismo con fecha el 01/11/1995.

Lippmann y cols., 1990, han estudiado el modelo hidrológico del campo y la forma en que interviene la Falla H en la distribución de fluidos, adicionando una estructura más Falla L, en la Figura 2.4.9, se observa el yacimiento  $\alpha$ , y  $\gamma$ , los estudios confieren como función principal del conjunto de fallas (Falla H) la conexión verticalmente entre ellos.

La recarga de fluido geotérmico en el yacimiento (Vapor), se observa en el modelo hidrológico de la Figura 2.4.11, el agua fría proveniente de la recarga del acuífero y la reinyección, ingresa a los yacimientos  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$ , traspasa el sistema de fallas y entra en contacto con las zonas de alta temperatura ( $300^\circ\text{C}$ ), produciendo un ligero porcentaje de fluido geotérmico; por lo tanto de acuerdo a los fenómenos establecidos a través de correlación entre los gastos de inyección, la ocurrencia del sismo a 1 km del intervalo disparado y del modelo hidrológico, determina que la profundidad alcanzada por el agua fría (sistema de inyección gravitacional o recarga del acuífero) es mayor a 3 km, produciendo fracturamiento debido al contacto entre los fluidos y el medio poroso, que se manifiesta en sismicidad inducida por la explotación y es adicional a la actividad tectónica de las fallas Cerro Prieto e Imperial, las cuales es de resaltar no presentan numerosas acumulaciones y asociaciones de sismos.

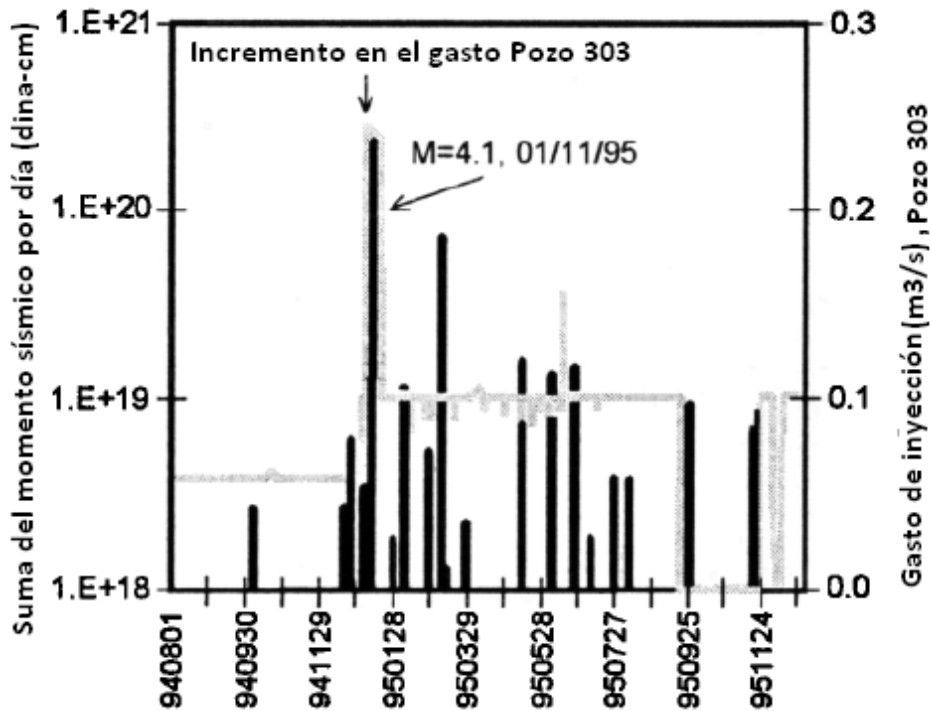


Figura 2.4.10. Comparativa del gasto de inyección diario en el pozo 303 (líneas negras) con la suma del momento sísmico en el día (líneas de color gris) (modificado de Fabriol y Munguía, 1997).

### Modelo Hidrológico del CGCP

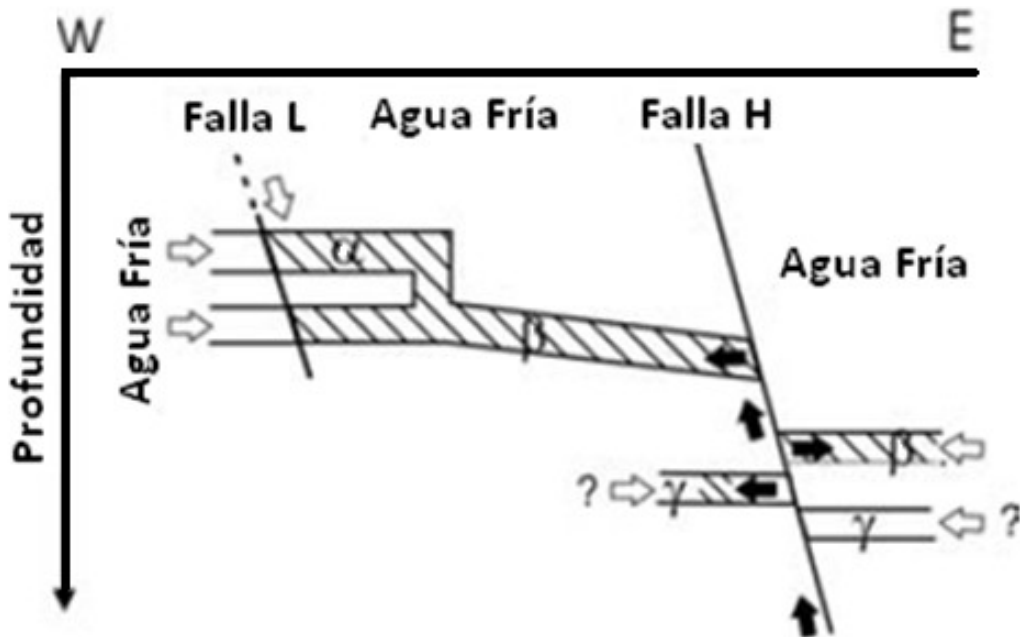


Figura 2.4.11. Modelo Hidrológico del CGCP, líneas blancas y negras indican flujo de agua fría y caliente, yacimientos  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$  (modificado de Glowacka y cols., 2005).



### 3 Discusión de resultados

A lo largo de la historia un sin número de fenómenos naturales han sido causa de alarma y preocupación para la población, la actividad sísmica se ha mantenido constante y las tasas de recurrencia se han mantenido al pasar de los años; debido al aumento en el desarrollo urbano y el flujo masivo de información, los efectos y daños producidos por la sismicidad se han amplificado. En respuesta múltiples profesionales se han enfocado en el análisis y estudio del comportamiento de estos fenómenos, para auxiliar y prevenir eventos futuros que llegarán a representar un peligro para la población; el monitoreo sísmico surgen como una herramienta utilizada para alertar a la población, y en casos más específicos rentable para explorar de forma indirecta el subsuelo, localizando estructuras y flujos de fluidos, útiles para el aprovechamiento geotérmico; Regionalmente las comunidades cercanas a los campos geotérmicos han logrado mantener un crecimiento sustentable entorno a la explotación geotérmica, Negrín (2009), ha presentado un estudio de rentabilidad en el campo de Cerro Prieto, y ha demostrado ser el proyecto con mayor contribución y eficiencia energética de la región e incluso a niveles de carácter mundial, además puntualizó la importante reducción de gases de efecto invernadero CO<sub>x</sub>, razón más que suficiente para justificar la inversión en el desarrollo de los campos geotérmicos de México, proyecto de perfil MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpio).

El estudio ha demostrado que el monitoreo y análisis de la actividad sísmica, es útil para relacionar los eventos con labores de explotación, logrando un conocimiento sinérgico entre las operaciones de producción y perforación con el yacimiento; contribuyendo al aprovechamiento de los recursos físicos y financieros. México ocupa a nivel mundial los primeros lugares en riqueza geotérmica, las herramientas para aprovecharla están presentes y el monitoreo sísmico sin duda de las más importantes.

#### 3.1 Monitoreo de la actividad sísmica

El periodo de vida de un yacimiento geotérmico en teoría es un ciclo ilimitado y consiste en 4 diferentes etapas: exploración, evaluación (modelado, planeación, rentabilidad, etc.), desarrollo y maduración; el monitoreo sísmico generalmente es

utilizado en las etapas maduras del yacimiento; no obstante su campo de aplicación es muy amplio, es preciso integrar el monitoreo durante las cuatro etapas; desde la exploración (zonas tectónicamente activas, fallamiento, etc.), explotación (modelado del yacimiento para estimar su comportamiento dinámico, localización de pozos, etc.), desarrollo y maduración (zonas permeables, direcciones de flujo, interacción pozo-yacimiento, etc.).

### 3.2 Relación con las operaciones de campo

El proceso de explotación consiste en diversos trabajos y procedimientos, a lo largo de la explotación se ha observado actividad sísmica asociada a las labores de perforación, inyección, estimulación y en menor cantidad a la producción, la forma de asociar los eventos con las actividades fue a través de sus ubicación espacial, porcentaje de sismos cercanos y la cantidad de sismos correlacionados en tiempo con los gastos que intervinieron en la operación; como resultado de la producción existen grandes volúmenes de agua residual, por lo tanto reinyectar al yacimiento buscando retroalimentar y mejorar la permeabilidad del mismo resulta un proceso limpio y eficaz, los gastos de inyección son altas cantidades de agua que son introducidas generalmente de forma gravitacional y en algunos casos a presión por conducto de bombas; en el análisis se observa que la inyección es el proceso con mayor efecto dinámico en el yacimiento y la actividad que produce mayores cambios de esfuerzos (microsismos) en la roca; sin embargo es importante señalar que la distribución de esfuerzos específica del yacimiento, infiere en la cantidad de sismos asociados a la operación, consecuentemente también se han observado numerosas acumulaciones asociadas a la producción y perforación.

En el campo Los Humeros la mayor cantidad de eventos se concentra en la zona de explotación (Figura 2.1.4); sismos no mayores a 3.2 grados se acumulan alrededor de los pozos inyectores del campo y se ha observado una relación entre los gastos de inyección con el número de sismos producidos. Los porcentajes de distribución determinan que la inyección presenta mayor actividad en comparación a la producción. De forma similar en

el campo Los Azufres la mayoría de los eventos se localizan en la zona de inyección (Zona B), con 50% del total de la distribución.

En Cerro Prieto y Tres Vírgenes la sismicidad se relaciona principalmente al movimiento tectónico; una numerosa cantidad de sismos se encuentran dispersos en las fallas activas, el resto se localiza en la zona explotación; en Tres Vírgenes los eventos asociados a los pozos inyectoros son mínimos; sin embargo el análisis logra asociar los eventos durante la perforación del último pozo productor y el ingreso de fluidos en la estimulación (inyección de ácidos o fluidos fracturantes), adicionalmente durante las pruebas de producción (Figura 2.3.9), se observaron incrementos en el número de sismos proporcionales al cambio de estrangulador, debido a la expansión del yacimiento producto de un depresionamiento o caída de presión, lo que indica que la sismicidad depende de la energía inducida y liberada por el yacimiento, con respecto al campo Cerro Prieto, considerando los eventos ubicados espacialmente en el perímetro del campo, la inyección supera en porcentaje a los eventos asociados a la producción (Figura 2.4.7), además similar al campo Los Humeros se observa una relación entre el gasto de inyección y ocurrencia de sismos (Figura 2.4.10, Fabriol y Munguía, 1997).

El efecto de la inducción de esfuerzos en un yacimiento, se manifiesta en la filtración de los fluidos en los cuerpos o estructuras colindantes, determina las zonas de mayor debilidad y estructuras sísmicamente activas en los campos; resulta razonablemente asociar las actividades de explotación y las fallas en las cercanías; Falla La Antigua y Los Humeros en CGLH, Falla La Cuesta y El Chino en Los Azufres, presentan mayor actividad sísmica y se localizan espacialmente en las inmediaciones de los pozos inyectoros y productores. En el campo Tres Vírgenes con el objetivo de traspasar la Falla La Cuesta, fue perforado el pozo LV 06 y se observó una relación cronológica de sismos durante el tiempo de perforación; en Cerro Prieto, la Falla H es considerada el principal medio conductor de fluidos y la ubicación de los pozos inyectoros es precisamente cercana para el aprovechamiento de su permeabilidad.

## 4 Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

El monitoreo, la interpretación, y el continuó estudio de la sismicidad en los campos geotérmicos de México, han generado diversos planteamientos y conclusiones, que conducen a relacionar la sísmica con las operaciones y actividades de explotación en los campos.

1. El monitoreo sísmico confirma cambios en los esfuerzos de la roca y la presencia de actividad en zonas donde no se había observado sismicidad, la cual ocurrió hasta el momento de la explotación del campo y confirma razonablemente que los eventos han sido inducidos por medio de las numerosas operaciones; la zona de explotación agrupa el porcentaje mayor de sismicidad local en tres de los cuatro campos geotérmicos principales de México. Exceptuando los campos de Tres Vírgenes y Cerro Prieto, ubicados en zonas de actividad tectónica numerosa.
2. Considerando la producción, perforación y la inyección en los pozos, como las operaciones de explotación esenciales; la inyección se manifiesta como la actividad generadora principal de sismicidad; en Los Humeros, Los Azufres y Cerro Prieto, la mayoría de sismos se agrupa principalmente en las cercanías de los pozos inyectoros, y se ha observado su ocurrencia en periodos cortos de tiempo (horas, minutos y segundos), hasta tiempos largos (años), en los cuales probablemente se asocien mecanismos generadores de microsismicidad adicionales. Las fallas cercanas a los pozos, también manifiestan cambios de esfuerzo (activación o reactivación), lo que permitió construir la proyección con su posible forma, echado y orientación.
3. Existen mecanismos termoporoelásticos que intervienen en el fracturamiento de los poros de las rocas, zonas de alta presión y temperatura han influido en un fracturamiento adicional no considerado en los estudios de los yacimientos Ghassemi (2007); un indicador de este fenómeno es la numerosa microsismicidad

concentrada en la zona de mayor temperatura en el campo Los Humeros, 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.

4. Durante el periodo 2009 - 2010 de monitoreo sísmico en el campo Tres Vírgenes, se logró asociar sismicidad a los trabajos de perforación y pruebas de producción en el pozo LV-06; asociado a la perforación, la actividad describe los tiempos de activación al alcanzar el objetivo estructural, falla La Cuesta, ordenados cronológicamente muestra la secuencia de activación durante el periodo de perforación de junio a diciembre del 2009, confirmando la inducción de esfuerzos y logrando proyectar la posible forma de la falla. Respecto a las pruebas de producción, se logra observar aumentos proporcionales en fechas y operaciones específicas durante las pruebas de pozo:

- Fin de la estimulación y proceso de limpieza para acidificación; 24/12/2009, 7 sismos.
- Ingreso de ácido al pozo, el 27/12/2009; incremento del número de sismos a 7
- Inicio de la inducción o calentamiento del pozo; el 06/01/2010, 7 sismos asociados.
- Prueba de Producción a 3 ½"; el 9/03/2010, 58 sismos.
- Prueba de producción; cambio de diámetro en la placa de orificio de 3 ½" a 4", el 23/04/2010, 10 sismos.

5. Es importante señalar que la actividad sísmica observada en el estudio, no rebasa los 4.2 grados de magnitud, a pesar de encontrarse en zonas tectónicamente activas; por lo tanto no se ha observado algún evento que pudiera significar un riesgo y peligro para la población, producto de la explotación en el campo.

### Recomendaciones

1. Al relacionar la actividad sísmica y las operaciones de explotación en campos geotérmicos como petroleros, es recomendable ampliar el campo de estudio a los análisis de sensibilidad (Simulación de Montecarlo, análisis de araña, análisis de tornado, etc.) de forma que se relacione el cambio de las propiedades en el yacimiento (permeabilidad, porosidad, radio de drene, saturación, etc.) y el cambio de esfuerzos o sismos (magnitud, profundidad, velocidad de onda, polaridad, etc.), lo que serviría para discretizar zonas de actividad mayor y determinar con precisión prospectos en donde se podría extender el área de explotación y por lo tanto localizaciones factibles para la perforación.
2. Es importante continuar con el monitoreo sísmico, para diferenciar los efectos de la termoporoelasticidad y de fracturamiento hidráulico, debido al tiempo necesario de ocurrencia para generar los diversos efectos, normalmente el efecto de termoporoelasticidad no es considerado en los términos de la permeabilidad y fracturamiento.
3. La actividad sísmica entorno a los yacimientos es numerosa y el monitoreo resulta una herramienta importante para aportar valiosa información en la toma de decisiones, es recomendable utilizarla en forma desde la etapa de exploración, durante la explotación e inclusive en etapas maduras de los yacimientos.

## Anexo A Tablas Hipocentrales

**Tabla A1.** Campo Los Humeros; parámetros hipocentrales seleccionados en el estudio. La fecha en año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora GMT en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); LATITUD Y LONGITUD, en grados; PROF, la profundidad focal en kilómetros; RMS, la raíz media cuadrática en kilómetros; y *Md*, magnitud de coda en grados.

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF (km)	RMS (Km)	Md (grado)
1	1997 1213	1104 53.1	19.686	-97.451	3.9	0.00	1.0
2	1997 1230	1614 44.3	19.686	-97.456	3.3	0.10	1.3
3	1997 1230	1709 24.4	19.688	-97.458	3.8	0.10	1.6
4	1997 1230	1726 58	19.685	-97.454	3.1	0.10	1.7
5	1997 1230	1727 38.3	19.682	-97.452	3.5	0.10	0.8
6	1997 1230	1953 52.8	19.687	-97.456	3.8	0.20	1.9
7	1997 1230	2002 1.2	19.684	-97.456	2.8	0.10	1.6
8	1997 1231	503 57.7	19.686	-97.453	3.6	0.10	1.9
9	1998 214	909 13.7	19.690	-97.454	2.7	0.10	1.2
10	1998 219	714 40.9	19.688	-97.455	3.0	0.10	1.8
11	1998 221	2239 28.1	19.687	-97.452	2.7	0.10	1.4
12	1998 223	1935 44.7	19.689	-97.455	3.6	0.10	1.5
13	1998 3 1	1847 3.4	19.687	-97.454	2.7	0.10	1.2
14	1998 3 7	1218 57	19.686	-97.455	3.9	0.10	1.5
15	1998 313	2111 23.9	19.689	-97.457	3.2	0.10	1.3
16	1998 321	323 4.2	19.690	-97.458	3.0	0.10	1.3
17	1998 322	1402 12.4	19.688	-97.457	3.3	0.00	1.4
18	1998 326	1547 58.2	19.665	-97.447	4.4	0.30	1.3
19	1998 329	1357 48.2	19.688	-97.455	3.1	0.10	1.7
20	1998 416	1829 5.1	19.689	-97.453	3.4	0.00	1.3
21	1998 417	2232 41.9	19.684	-97.446	2.7	0.00	0.9
22	1998 5 8	1843 21.9	19.687	-97.455	3.5	0.10	1.7
23	1998 512	1547 5.9	19.686	-97.458	2.7	0.10	1.3
24	1998 528	1954 16.8	19.689	-97.456	2.6	0.20	1.4
25	1998 618	1812 20.8	19.696	-97.467	1.9	0.10	1.5
26	1998 619	1952 39.8	19.691	-97.464	2.6	0.00	1.2
27	1998 629	1746 22.3	19.685	-97.456	4.1	0.00	1.5
28	1998 713	2223 19.6	19.691	-97.458	2.5	0.10	1.5
29	1998 725	2019 34.1	19.685	-97.450	2.8	0.00	1.2
30	1998 726	2105 7.3	19.689	-97.457	3.1	0.10	1.3
31	1998 8 6	814 47.3	19.683	-97.453	2.7	0.10	1.7
32	1998 8 7	406 29.8	19.681	-97.445	3.3	0.10	1.6
33	1998 812	824 27.9	19.688	-97.456	3.2	0.10	1.3
34	1998 9 3	1921 20.9	19.694	-97.456	3.6	0.10	1.2
35	1998 9 3	1928 37.1	19.693	-97.455	2.9	0.10	1.4

Anexo A Tablas Hipocentrales 94

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF (km)	RMS (Km)	Md (grado)
36	1998 9 4	934 56.8	19.693	-97.455	2.8	0.10	1.0
37	1998 910	1824 26.1	19.689	-97.454	3.8	0.10	1.2
38	1998 912	438 33.6	19.691	-97.456	3.2	0.10	1.7
39	1998 920	43 15.1	19.691	-97.457	3.9	0.10	1.3
40	1998 923	207 2.5	19.689	-97.457	3.4	0.10	1.4
41	1998 928	1152 32.8	19.691	-97.457	3.9	0.10	1.4
42	1998 928	2303 42.8	19.690	-97.456	4.3	0.10	1.3
43	1998 10 2	1539 48.7	19.692	-97.455	4.2	0.10	1.5
44	1998 10 6	28 55	19.672	-97.432	3.8	0.10	1.3
45	1998 10 8	225 6.5	19.689	-97.458	3.0	0.10	1.4
46	1998 1013	534 30.4	19.691	-97.458	3.3	0.10	1.5
47	1998 1018	1904 52.9	19.689	-97.456	2.8	0.10	1.3
48	1998 1027	620 8.6	19.689	-97.461	3.1	0.00	1.6
49	1998 1030	442 8.7	19.689	-97.455	3.5	0.10	1.4
50	1998 1031	558 39.7	19.690	-97.456	3.7	0.10	1.3
51	1998 11 1	1944 56.6	19.691	-97.457	3.4	0.10	1.4
52	1998 11 4	1341 36.6	19.691	-97.457	3.7	0.10	1.5
53	1998 1112	524 49.6	19.690	-97.456	2.9	0.10	1.2
54	1998 1114	642 31.6	19.688	-97.454	2.9	0.10	1.3
55	1998 12 3	325 19.7	19.691	-97.458	3.7	0.10	1.2
56	1998 12 4	1452 23.4	19.690	-97.456	3.8	0.10	1.6
57	1998 1210	1832 19.1	19.689	-97.455	3.1	0.10	1.4
58	1998 1223	2358 43.2	19.687	-97.456	2.7	0.10	1.3
59	1998 1229	818 9.2	19.685	-97.457	4.3	0.10	1.4
60	1999 1 4	1035 45.8	19.691	-97.454	4.1	0.10	1.5
61	1999 1 6	715 7.3	19.693	-97.455	3.4	0.10	1.1
62	1999 1 9	919 35.2	19.689	-97.458	4.1	0.10	1.3
63	1999 123	300 33.7	19.689	-97.454	3.0	0.10	1.2
64	1999 127	1709 47.9	19.690	-97.455	3.1	0.10	1.3
65	1999 130	4 51	19.692	-97.455	2.5	0.10	1.4
66	1999 2 2	135 1.7	19.674	-97.467	1.7	0.10	1.4
67	1999 2 2	141 49.3	19.690	-97.455	3.1	0.10	1.5
68	1999 2 3	602 47.7	19.691	-97.456	3.7	0.10	1.1
69	1999 211	137 26.5	19.661	-97.448	2.5	0.10	1.1
70	1999 212	1732 43.9	19.698	-97.452	2.6	0.00	1.3
71	1999 220	1304 52.3	19.687	-97.458	3.4	0.10	1.3
72	1999 310	53 56.3	19.691	-97.457	3.8	0.10	1.3
73	1999 426	612 2.9	19.690	-97.456	3.2	0.10	1.4
74	1999 511	437 5.5	19.690	-97.463	4.6	0.10	1.3
75	1999 528	245 10.4	19.692	-97.457	3.5	0.10	1.3
76	1999 528	253 19.9	19.692	-97.456	2.9	0.10	1.3
77	1999 528	303 55.4	19.693	-97.456	4.1	0.10	1.5



## 95 Anexo A Tablas Hipocentrales

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF (km)	RMS (Km)	Md (grado)
78	1999 528	409 42	19.691	-97.454	3.9	0.10	1.2
79	1999 611	1556 47.2	19.658	-97.454	1.3	0.20	1.4
80	1999 618	1728 52.1	19.693	-97.462	5.7	0.10	1.5
81	1999 618	1734 19.9	19.690	-97.455	3.5	0.10	1.5
82	1999 624	1006 46.5	19.682	-97.464	5.1	0.00	1.4
83	1999 711	1501 6.1	19.686	-97.456	3.3	0.00	1.2
84	1999 716	16 2.4	19.684	-97.458	3.6	0.00	1.1
85	1999 716	1004 18.4	19.684	-97.458	3.8	0.00	0.9
86	1999 716	1733 16.7	19.685	-97.460	3.6	0.00	0.8
87	1999 721	150 40.9	19.696	-97.455	2.9	0.00	1.3
88	1999 722	747 57.6	19.685	-97.461	2.9	0.10	1.0
89	1999 723	137 52	19.682	-97.457	3.5	0.00	1.0
90	1999 723	309 29.7	19.687	-97.455	3.9	0.00	1.1
91	1999 724	713 9.3	19.688	-97.458	2.6	0.10	1.2
92	1999 728	1327 16	19.685	-97.460	3.6	0.00	0.7
93	1999 730	1926 41	19.685	-97.458	3.8	0.00	0.9
94	1999 8 5	2317 6.4	19.689	-97.454	3.4	0.10	1.1
95	1999 8 6	141 25.8	19.691	-97.457	3.0	0.10	1.1
96	1999 8 6	806 47.7	19.692	-97.456	3.1	0.00	1.1
97	1999 819	1108 44.7	19.683	-97.456	3.7	0.00	0.7
98	1999 819	1527 10.7	19.687	-97.457	3.5	0.00	0.6
99	1999 821	1844 41.8	19.667	-97.448	3.6	0.10	1.8
100	1999 917	1338 46.3	19.678	-97.465	1.2	0.10	1.4
101	1999 923	1029 8.4	19.678	-97.463	1.8	0.10	1.4
102	1999 11 2	449 26.7	19.669	-97.432	3.7	0.10	1.1
103	1999 1123	412 48.4	19.674	-97.452	4.2	0.00	1.3
104	2000 1 9	1313 13.4	19.671	-97.454	3.4	0.10	1.7
105	2000 1 9	1820 48.4	19.670	-97.449	4.1	0.10	1.8
106	2000 322	113 57.8	19.689	-97.445	4.5	0.00	1.3
107	2000 328	150 30.3	19.689	-97.456	3.7	0.10	1.5
108	2000 4 3	452 49.3	19.690	-97.452	2.7	0.10	1.3
109	2000 4 7	731 38	19.691	-97.456	3.4	0.10	1.5
110	2000 411	142 19.8	19.688	-97.454	3.1	0.10	1.3
111	2000 5 7	2359 32.4	19.624	-97.459	0.8	0.20	1.4
112	2000 517	533 39.7	19.689	-97.454	2.5	0.00	1.8
113	2000 517	533 39.6	19.688	-97.457	2.8	0.00	1.8
114	2000 527	1801 21.4	19.690	-97.453	1.6	0.10	1.5
115	2000 613	2209 15.5	19.689	-97.455	3.4	0.10	1.1
116	2000 616	2229 26.5	19.663	-97.448	3.7	0.10	1.9
117	2000 619	219 25.5	19.667	-97.445	3.9	0.10	1.5
118	2000 619	451 38.1	19.660	-97.446	4.3	0.10	1.1
119	2000 625	2053 7.8	19.675	-97.441	4.0	0.00	1.5

Anexo A Tablas Hipocentrales 96

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF (km)	RMS (Km)	Md (grado)
120	2000 625	2340 42.4	19.689	-97.451	3.3	0.00	1.5
121	2000 628	1047 18.5	19.688	-97.456	3.2	0.10	1.4
122	2000 728	1917 15.9	19.688	-97.456	2.9	0.10	1.1
123	2000 728	1917 15.9	19.688	-97.456	3.0	0.10	1.2
124	2000 8 6	7 3.3	19.674	-97.465	2.1	0.00	1.5
125	2000 8 6	7 28.9	19.672	-97.455	3.3	0.00	1.8
126	2000 8 8	638 53.8	19.690	-97.457	2.5	0.00	1.6
127	2000 8 8	638 53.7	19.689	-97.454	3.9	0.00	1.7
128	2000 817	2336 49.1	19.690	-97.453	3.2	0.10	1.7
129	2000 817	2342 42.1	19.686	-97.455	2.7	0.10	1.3
130	2000 822	1903 58	19.693	-97.459	2.6	0.00	1.4
131	2000 11 5	713 50.1	19.688	-97.461	3.1	0.00	1.6
132	2000 1222	349 45.6	19.678	-97.467	1.8	0.10	1.4
133	2001 325	301 6.3	19.689	-97.455	3.6	0.10	1.7
134	2001 325	1402 37.2	19.690	-97.455	2.7	0.00	1.5
135	2001 326	17 49.6	19.690	-97.453	2.9	0.10	1.4
136	2001 421	1243 22.6	19.668	-97.429	3.1	0.10	1.6
137	2001 7 7	21 7.1	19.688	-97.460	3.9	0.10	1.4
138	2001 7 7	21 7.1	19.688	-97.459	3.8	0.10	1.7
139	2001 727	345 7.1	19.687	-97.463	3.5	0.00	1.7
140	2001 927	5 29.1	19.687	-97.440	1.8	0.00	1.9
141	2001 1020	458 41.7	19.691	-97.464	3.2	0.10	1.4
142	2001 1022	1023 57.4	19.691	-97.458	3.8	0.00	1.7
143	2001 1116	622 35.7	19.690	-97.463	3.3	0.00	1.2
144	2001 1124	441 47.1	19.692	-97.462	2.8	0.00	1.7
145	2001 1211	531 53.8	19.693	-97.446	2.1	0.10	1.7
146	2001 1211	537 18.7	19.687	-97.456	3.1	0.00	1.5
147	2002 110	1844 25.1	19.669	-97.451	3.7	0.10	1.8
148	2002 121	1815 34.8	19.672	-97.463	4.0	0.50	3.2
149	2002 2 4	1226 25.5	19.691	-97.444	1.7	0.10	1.8
150	2002 320	113 20.7	19.689	-97.459	1.0	0.20	2.1
151	2004 413	802 13.7	19.686	-97.459	3.0	0.00	1.8
152	2004 425	2220 25.1	19.685	-97.470	2.2	0.00	2.1
153	2004 615	1117 33.4	19.687	-97.472	1.9	0.00	1.6
157	2004 7 3	1232 59.6	19.689	-97.458	2.9	0.10	1.9
158	2004 722	2312 35.6	19.689	-97.457	3.0	0.00	1.2
159	2004 728	1651 52.3	19.681	-97.470	1.8	0.10	1.3
160	2004 729	1704 11.4	19.688	-97.467	2.8	0.00	1.4
161	2004 918	2028 20.5	19.673	-97.438	2.2	0.00	1.2
162	2005 213	1954 17.7	19.661	-97.446	3.3	0.00	2.2
163	2005 314	1744 27.3	19.686	-97.456	3.6	0.00	1.1
164	2005 1219	2038 43.5	19.697	-97.442	1.9	0.00	1.7

## 97 Anexo A Tablas Hipocentrales

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF (km)	RMS (Km)	Md (grado)
165	2005 1225	1854 21.9	19.689	-97.442	2.0	0.00	1.6
166	2006 119	1336 6.8	19.686	-97.452	2.4	0.10	1.4
167	2006 121	750 2.6	19.689	-97.465	4.2	0.10	1.3
168	2006 121	1615 38.2	19.696	-97.469	2.2	0.00	1.4
169	2006 130	108 59.6	19.698	-97.466	1.1	0.10	1.0
170	2006 130	109 15.4	19.695	-97.463	1.5	0.10	1.5
171	2006 131	1155 23.8	19.693	-97.467	2.1	0.00	1.5
172	2006 2 2	253 9.3	19.687	-97.455	2.5	0.10	1.2
173	2006 2 4	901 41.6	19.690	-97.470	2.1	0.00	1.3
174	2006 2 4	1921 10.4	19.687	-97.460	2.5	0.10	1.5
175	2006 211	2105 38.2	19.694	-97.464	2.5	0.10	1.5
176	2006 213	700 22.9	19.692	-97.459	3.5	0.10	1.5
177	2006 221	737 32.3	19.687	-97.459	2.6	0.10	1.5
178	2006 224	242 14.9	19.692	-97.467	3.5	0.00	1.4
179	2006 224	242 14.9	19.692	-97.468	3.4	0.00	1.0
180	2006 224	850 12.8	19.689	-97.461	2.4	0.10	1.3
181	2006 224	2057 40.4	19.693	-97.467	2.0	0.00	1.3
182	2006 224	2057 40.5	19.692	-97.466	2.0	0.00	1.1
183	2006 3 3	1537 11.6	19.690	-97.471	2.0	0.00	1.5
184	2006 3 9	1744 16.2	19.693	-97.466	1.9	0.10	1.2
185	2006 311	1109 10	19.693	-97.465	2.1	0.00	1.1
186	2006 316	2018 20.5	19.693	-97.468	1.9	0.10	1.5
187	2006 319	1226 39.4	19.690	-97.463	2.5	0.10	1.2
188	2006 320	1629 20.5	19.690	-97.462	2.2	0.10	1.5
189	2006 419	411 58.9	19.688	-97.451	3.4	0.00	0.9
190	2006 5 2	1159 32.8	19.687	-97.453	3.9	0.00	1.1
191	2006 5 5	17 8.2	19.686	-97.451	4.1	0.00	1.1
192	2006 515	1716 1 .6	19.697	-97.461	4.2	0.00	1.5
193	2006 516	1939 24 9	19.679	-97.433	3.6	0.00	1.2
194	2006 626	36 40.1	19.682	-97.467	3.3	0.00	1.1
195	2006 628	2113 29	19.695	-97.458	4.4	0.00	1.2
196	2006 10 7	2054 3.2	19.695	-97.461	4.0	0.00	1.4
197	2006 10 9	120 9.1	19.694	-97.463	3.6	0.00	1.3
198	2006 1015	1924 57.3	19.692	-97.465	3.4	0.00	1.3
199	2007 714	721 9.7	19.689	-97.460	2.4	0.00	1.0
200	2007 719	123 54.6	19.697	-97.471	1.4	0.00	1.2
201	2007 11 3	302 5.2	19.692	-97.464	2.1	0.00	1.3
202	2007 11 3	302 5.1	19.694	-97.469	1.3	0.00	1.5
203	2007 11 5	2259 25.8	19.696	-97.456	0.8	0.20	1.1
204	2007 1214	1345 50.6	19.688	-97.462	4.8	0.00	1.6
205	2007 1225	25 43.4	19.680	-97.460	2.8	0.00	0.7
206	2008 1 5	450 29.1	19.695	-97.467	2.1	0.00	1.6

Anexo A Tablas Hipocentrales 98

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF (km)	RMS (Km)	Md (grado)
207	2008 1 9	1119 16.4	19.695	-97.464	2.1	0.00	0.8
208	2008 1 9	1119 31.3	19.697	-97.463	2.2	0.00	0.9
209	2008 1 9	2012 54.5	19.696	-97.465	2.0	0.00	1.5
210	2008 110	1952 39.1	19.694	-97.484	1.1	0.00	0.6
211	2008 110	1952 39.2	19.694	-97.481	0.7	0.00	0.8
212	2008 110	1952 53.5	19.691	-97.478	1.8	0.00	1.4
213	2008 110	1952 53.8	19.673	-97.448	2.5	0.10	0.9
214	2008 114	126 30.8	19.697	-97.466	2.0	0.00	1.4
215	2008 115	839 28.7	19.694	-97.466	2.2	0.00	1.9
216	2008 127	248 56.4	19.692	-97.469	1.4	0.00	1.4
217	2008 128	235 37.6	19.697	-97.464	1.9	0.00	1.4
218	2008 131	1407 35.9	19.677	-97.460	5.0	0.00	1.4
219	2008 2 4	2307 57.7	19.678	-97.465	4.6	0.00	1.0
220	2008 2 9	401 15.8	19.695	-97.466	1.9	0.00	1.8
221	2008 211	1032 41.6	19.693	-97.470	1.1	0.00	1.5
222	2008 5 7	444 26	19.690	-97.441	1.8	0.00	1.4
223	2008 513	1047 40.9	19.679	-97.474	2.5	0.10	1.9
224	2008 723	642 38.2	19.664	-97.444	4.4	0.00	1.7
225	2008 823	750 37.1	19.687	-97.450	4.0	0.10	1.1
226	2008 823	750 37.1	19.690	-97.450	4.5	0.10	1.1
227	2008 825	1747 39.4	19.688	-97.460	4.8	0.10	1.2
228	2008 830	233 27.1	19.687	-97.463	3.0	0.10	0.9
229	2008 831	13 29.1	19.673	-97.471	3.3	0.10	1.5
230	2008 831	27 47.9	19.666	-97.453	3.4	0.10	1.2
231	2008 9 6	1948 13.7	19.669	-97.442	3.9	0.00	1.3
232	2008 9 8	1631 22.3	19.676	-97.436	4.2	0.00	1.7
233	2008 9 8	1633 2.7	19.667	-97.436	3.8	0.10	1.0
234	2008 914	318 38.2	19.689	-97.458	3.4	0.00	1.4
235	2008 922	309 19.5	19.680	-97.432	3.6	0.00	1.1
236	2008 925	517 41.1	19.673	-97.434	2.5	0.00	1.4
237	2008 10 1	1941 35.1	19.678	-97.460	4.5	0.00	1.3

## 99 Anexo A Tablas Hipocentrales

**Tabla A2.1.** Los Azufres sismos seleccionados del estudio de Lermo y cols., 2009, parámetros hipocentrales seleccionados. La fecha en año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora GMT en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); LATITUD Y LONGITUD, en grados; PROF, la profundidad focal en kilómetros; RMS, la raíz media cuadrática en kilómetros; y Md, magnitud de coda en grados.

<b>Nº SISMO</b>	<b>FECHA AA/MM/DD</b>	<b>HORA GMT HH:MM:SS</b>	<b>LATITUD (grados)</b>	<b>LONGITUD (grados)</b>	<b>PROF. (km)</b>	<b>RMS (Km)</b>	<b>Md (grado)</b>
1	2000 1109	1115 4.1	19.824	-100.688	1.9	0.00	0.4
2	2005 118	1326 39.9	19.842	-100.674	2.6	0.00	0.4
3	2005 120	746 13.3	19.834	-100.672	1.8	0.00	0.5
4	2005 128	1844 2.9	19.828	-100.690	1.7	0.00	0.1
5	2005 129	2255 8.9	19.829	-100.687	1.9	0.00	0.7
6	2005 3 1	2056 10.1	19.828	-100.691	1.6	0.00	0.3
7	2005 3 1	2132 54	19.828	-100.694	2.0	0.00	0.3
8	2005 3 1	2132 58.6	19.831	-100.692	2.1	0.00	0.8
9	2005 3 1	2133 42	19.827	-100.694	2.2	0.00	0.8
10	2005 313	225 15.1	19.827	-100.679	0.6	0.00	0.4
11	2005 319	1221 3	19.825	-100.685	1.6	0.10	0.3
12	2005 528	1305 54.4	19.830	-100.682	1.9	0.00	0.6
13	2005 10 1	1624 0.4	19.827	-100.684	1.6	0.10	0.7
14	2005 10 5	1659 38.4	19.825	-100.685	1.2	0.00	0.4
15	2005 1011	841 17	19.792	-100.686	3.0	0.00	1.0
16	2005 1016	1128 35.1	19.825	-100.685	0.9	0.00	0.4
17	2005 1024	1607 27	19.830	-100.690	1.7	0.00	0.4
18	2005 910	424 22.3	19.830	-100.691	1.4	0.00	0.2
19	2005 922	2148 44.4	19.826	-100.683	0.8	0.00	0.1
20	2005 924	534 17	19.828	-100.686	1.9	0.00	0.6
21	2005 1031	731 3.4	19.843	-100.679	3.1	0.00	0.7
22	2005 217	1040 30.3	19.778	-100.698	1.4	0.00	0.4
23	2005 218	800 14.5	19.777	-100.697	1.5	0.10	0.6

**Tabla A2.2** Campo Los Azufres; sismos seleccionados del estudio de Valdez y cols., 2009, parámetros hipocentrales seleccionados. La fecha en año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora GMT en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); LATITUD Y LONGITUD, en grados; PROF, la profundidad focal en kilómetros; RMS, la raíz media cuadrática en kilómetros; y Md, magnitud de coda en grados.

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM SS	LATITUD (Grados)	LONGITUD (Grados)	PROF (km)	RMS (Km)	Md (Grado)
1	90408	552 19.87	19.791	-100.674	2.42	0.83	0.17
2	90409	825 53.74	19.820	-100.812	3.9	1.56	0.14
3	90409	951 17.86	19.803	-100.824	9.07	1.39	0.07
4	90415	1523 19.32	19.884	-100.829	3	1.82	0.09
5	90419	713 17.1	19.806	-100.688	0.15	0.76	0.05
6	90419	809 15.89	19.806	-100.687	0.14	0.81	0.05
7	90422	135 44.68	19.823	-100.675	1.38	0.33	0.11
8	90422	135 47.75	19.829	-100.671	3	0.32	0.18
9	90422	135 55.66	19.824	-100.673	1.62	0.34	0.09
10	90422	135 58.59	19.825	-100.678	0.27	0.28	0.1
11	90422	144 8.37	19.827	-100.675	1.12	0.34	0.06
12	90422	144 9.35	19.824	-100.672	3	0.26	0.26
13	90422	144 24.13	19.824	-100.674	1.56	0.78	0.08
14	90422	1930 41.78	19.807	-100.687	0.1	1.04	0.05
15	90427	1426 33.84	19.762	-100.754	4.88	1.14	0.2
16	90429	157 33.35	19.821	-100.692	1.45	0.58	0.03
17	90430	227 7.42	19.821	-100.693	1.32	0.82	0.03
18	90512	1732 2.66	19.799	-100.677	3.19	1.36	0.07
19	90512	1812 48.81	19.808	-100.694	2.49	1.19	0.24
20	90514	1221 42.55	19.800	-100.752	5.49	1.2	0.18
21	90518	1120 17.95	19.806	-100.908	3	1.67	0.11
22	90519	722 17.71	19.877	-100.800	6.2	1.84	0.07
23	90519	902 54.22	19.879	-100.802	5.95	0.5	0.08
24	90519	908 9.82	19.882	-100.890	3	1.86	0.01
25	90521	1647 16.61	19.823	-100.715	1.71	1.25	0.06
26	90521	1649 59.44	19.820	-100.705	1.37	0.54	0.04
27	90526	1328 33.33	19.813	-100.688	2.78	0.94	0.01
28	90526	1616 50.48	19.809	-100.674	3.15	0.69	0.09
29	90527	1503 12.8	19.850	-100.803	6.28	1.36	0.08
30	90527	1822 30.44	19.857	-100.845	1.84	1.73	0.1
31	90529	419 20.91	19.818	-100.690	2.33	0.64	0.05
32	90531	18 53.2	19.817	-100.693	1.6	0.59	0.08
33	90531	939 41.84	19.819	-100.692	2.34	0.26	0.03
34	90531	939 47.9	19.818	-100.693	2.32	0.09	0.05
35	90531	939 55.72	19.817	-100.694	2.52	0.26	0.05

## 101 Anexo A Tablas Hipocentrales

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM SS		LATITUD (Grados)	LONGITUD (Grados)	PROF (km)	RMS (Km)	Md (Grado)
36	90531	940	23.89	19.818	-100.695	2.54	0.09	0.08
37	90531	942	14.75	19.813	-100.700	2.23	0.09	0.09
38	90601	1620	18.6	19.805	-100.687	2.96	0.52	0.02
39	90601	2130	38.45	19.846	-100.708	0	0.35	0.49
40	90603	2354	7.37	19.846	-100.708	3.8	0.79	0.14
41	90613	1805	25.07	19.955	-100.786	0.02	1.94	0.34
42	90615	1441	19.85	19.823	-100.684	3.23	0.52	0.1
43	90618	829	31.45	19.837	-100.695	1.45	0.59	0.12
44	90618	918	20.06	19.821	-100.686	2.29	0.48	0.06
45	90627	531	17.36	19.782	-100.741	6.48	0.87	0.2
46	90627	1802	5.83	19.821	-100.753	11.59	0.84	0.26
47	90629	2357	36.26	19.825	-100.700	2.82	0.62	0.17
48	90718	2112	21.71	19.824	-100.700	0.01	0.26	1.59
49	90722	20	39.55	19.822	-100.683	0.97	0.91	0.06
50	90724	649	58.15	19.828	-100.686	1.36	0.22	0.1
51	90727	104	3.17	19.816	-100.686	1.76	0.91	0.05
52	90727	115	42.96	19.820	-100.687	1.74	0.75	0.06
53	90727	125	45.02	19.925	-100.755	5.74	1.75	0.12
54	90727	2107	52.03	19.902	-100.789	4.15	1.9	0.14
55	90727	2146	24.73	19.904	-100.800	4.52	1.77	0.08
56	90731	1718	3.21	19.796	-100.839	3	1.7	0.05
57	90806	1942	30.45	19.823	-100.701	3	0.34	0.19
58	90809	1742	0.3	19.821	-100.719	0	0.4	1.14
59	90809	2200	37.37	19.812	-100.736	3.2	0.42	0.11
60	90812	2206	19.05	19.824	-100.678	2.99	0.99	0.1
61	90813	729	26.82	19.771	-100.735	3	0.87	0.02
62	90813	1753	12.06	19.829	-100.668	2.36	0.96	0.04
63	90815	1736	17.97	19.805	-100.674	3	0.59	0.36
64	90819	2222	50.06	19.837	-100.679	0.06	0.47	1.26
65	90820	1000	29.1	19.824	-100.699	2.17	0.43	0.19
66	90821	635	42.17	19.825	-100.700	3	0.74	0.15
67	90821	1013	43.77	19.792	-100.684	0.9	0.86	0.07
68	90821	1016	12.79	19.790	-100.684	1.3	0.65	0.09
69	90822	20	16.19	19.739	-100.688	3	0.41	0.27
70	90823	1423	43.34	19.829	-100.690	3	0.71	0.05
71	90823	1432	19.78	19.812	-100.683	2.99	0.31	0.05
72	90823	1432	25.22	19.827	-100.688	3	0.71	0.05
73	90823	1432	55.16	19.826	-100.690	2.99	0.21	0
74	90823	1433	2.78	19.858	-100.691	0.33	0.6	0.22
75	90823	1433	32.64	19.823	-100.688	2.58	0.57	0.03
76	90823	1434	29.95	19.826	-100.685	3.22	0.44	0.06

Anexo A Tablas Hipocentrales 102

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM SS		LATITUD (Grados)	LONGITUD (Grados)	PROF (km)	RMS (Km)	Md (Grado)
77	90823	1434	34.99	19.836	-100.689	3.31	0.67	0.11
78	90824	345	4.81	19.825	-100.687	3.27	0.76	0.21
79	90827	1748	1.05	19.801	-100.718	3	0.7	0.03
80	90829	1830	1.72	19.804	-100.678	0.1	0.3	0.15
81	90829	1830	19.73	19.828	-100.694	1.79	0.55	0.2
82	90829	1838	30.66	19.800	-100.775	17.21	1.02	0.05
83	90902	119	24.81	19.803	-100.666	0.07	0.47	0.16
84	90902	133	32.14	19.798	-100.671	2.74	0.69	0.03
85	90903	1843	53.17	19.788	-100.623	0.67	0.84	1.03
86	90904	250	23.82	19.764	-100.653	0.12	0.26	0.56
87	90904	250	25.92	19.781	-100.649	0	0.23	0.78
88	90905	1936	57.77	19.618	-100.836	3	1.59	0.32
89	90908	1842	37.52	19.788	-100.658	0	0.52	0.64
90	90910	1304	49.89	19.831	-100.688	0.18	0.48	0.19
91	90910	1304	55.58	19.815	-100.687	0.34	0.16	0.06
92	90910	1304	59.27	19.813	-100.699	0.09	0.02	0.23
93	90911	1909	9.8	19.794	-100.715	3	0.18	0.76
94	90913	355	34.98	20.010	-100.633	3	1.01	0.87
95	90927	1310	45.03	19.806	-100.686	3.45	1.13	0.02
96	90928	1751	27.45	19.815	-100.672	0.32	0.52	0.43
97	90928	1752	34.25	19.811	-100.691	0.21	0.78	0.09
98	91001	1733	38.44	19.805	-100.683	1.44	0.38	0.15
99	91001	1733	44	19.803	-100.687	0.97	1.31	0.06
100	91002	1424	50.58	19.825	-100.689	1.18	0.72	0.04
101	91010	1247	26.05	19.850	-100.822	3.07	1.32	0.1
102	91022	322	23.32	19.809	-100.719	4.69	1.23	0.08
103	91023	537	4.06	19.809	-100.718	5.42	0.95	0.05
104	91025	906	49.84	19.799	-100.676	0.23	0.39	0.2
105	91031	45	34.91	19.804	-100.688	0.08	0.64	0.13
106	91102	1554	49.22	19.798	-100.694	0.12	0.66	0.07
107	91105	1854	18.93	19.799	-100.690	1.96	1.24	0.23
108	91105	1857	57.02	19.802	-100.701	3	0.65	0.11



### 103 Anexo A Tablas Hipocentrales

**Tabla A3.** Campo Tres Vírgenes; parámetros hipocentrales seleccionados. La fecha en año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora GMT en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); LATITUD Y LONGITUD, en grados; PROF, la profundidad focal en kilómetros; RMS, la raíz media cuadrática en kilómetros; y Md, magnitud de coda en grados.

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (Grados)	LONGITUD (Grados)	PROF (km)	RMS (Km)	Md (Grado)
1	2003 920	0525 10.1	27.524	-112.541	5.2	0.00	0.9
2	2003 920	2247 51.9	27.521	-112.545	4.8	0.00	0.9
3	2003 922	2008 39.5	27.450	-112.565	4.3	0.00	0.5
4	2003 10 2	0200 56.2	27.428	-112.686	2.0	0.70	1.3
5	2003 10 2	0303 41.9	27.373	-112.579	5.8	0.00	1.6
6	2003 10 2	0900 28.6	27.427	-112.690	2.0	0.60	1.4
7	2003 10 4	1539 37.6	27.423	-112.501	4.6	0.00	1.2
8	2003 1014	0733 15.8	27.389	-112.462	7.0	0.00	1.6
9	2003 1018	1153 27.1	27.506	-112.584	5.5	0.00	1.3
10	2003 1018	1156 53.1	27.504	-112.580	5.5	0.00	0.8
11	2003 1024	0615 39.9	27.525	-112.568	2.8	0.00	1.0
12	2003 1025	2318 37.7	27.528	-112.536	2.1	0.10	1.4
13	2003 11 2	2320 26.6	27.523	-112.576	5.2	0.10	1.4
14	2003 11 5	1735 18.5	27.467	-112.611	4.7	0.00	1.9
15	2003 11 5	1735 52.4	27.468	-112.611	5.0	0.00	1.6
16	2003 11 5	1851 1.6	27.534	-112.580	3.5	0.00	1.9
17	2003 1113	0051 52.4	27.447	-112.579	6.9	0.10	1.6
18	2003 1117	1344 22.2	27.408	-112.484	6.9	0.00	2.0
19	2003 1119	2022 51.5	27.398	-112.470	8.1	0.00	1.9
20	2004 125	1945 34.4	27.402	-112.527	9.1	0.00	1.5
21	2004 714	1913 5.4	27.505	-112.596	3.1	0.00	1.8
22	2004 8 7	2121 5.3	27.516	-112.584	2.5	0.00	1.5
23	2004 8 8	0820 54.5	27.518	-112.587	1.6	0.00	1.5
24	2004 812	0119 39.8	27.540	-112.586	7.4	0.10	1.8
25	2004 830	0730 49.0	27.546	-112.550	6.4	0.10	1.7
26	2004 929	0734 28.0	27.565	-112.548	8.2	0.00	1.7
27	2004 10 2	1753 11.6	27.407	-112.543	6.9	0.00	1.7
28	2004 10 7	1212 54.6	27.492	-112.555	4.0	0.00	1.5
29	2004 10 7	1714 4.1	27.492	-112.561	5.0	0.00	1.3
30	2004 10 8	0846 32.0	27.496	-112.579	3.7	0.00	1.6
31	2004 1013	1115 50.4	27.435	-112.499	8.9	0.00	1.3
32	2004 1024	0326 55.1	27.514	-112.579	2.0	0.10	1.8
33	2004 1031	0426 42.2	27.589	-112.515	6.9	0.20	1.7
34	2004 11 1	0628 59.6	27.499	-112.563	0.8	1.60	0.5
35	2004 11 1	2048 36.4	27.523	-112.552	4.6	0.00	1.7

Anexo A Tablas Hipocentrales 104

Nº SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (Grados)	LONGITUD (Grados)	PROF (km)	RMS (Km)	Md (Grado)
36	2004 1127	1601 16.0	27.517	-112.549	1.1	0.10	1.1
37	2006 527	0015 19.4	27.519	-112.580	2.0	0.10	1.4
38	2006 530	2047 36.5	27.511	-112.555	2.0	0.10	1.5
39	2006 530	2048 55.3	27.523	-112.548	2.8	0.10	1.4
40	2006 531	1817 29.4	27.455	-112.597	5.9	0.00	1.8
41	2006 6 3	1126 37.8	27.399	-112.508	5.8	0.10	1.7
42	2006 6 3	1127 15.3	27.405	-112.501	6.4	0.00	1.6
43	2006 6 3	1154 27.2	27.405	-112.495	6.5	0.00	1.8
44	2006 613	1020 19.5	27.511	-112.522	7.0	0.00	1.7
45	2006 613	1053 48.2	27.514	-112.520	7.0	0.00	1.4
46	2006 717	1756 8.9	27.517	-112.535	8.5	0.00	1.3
47	2006 8 7	0240 25.3	27.400	-112.497	6.7	0.00	1.5
48	2006 8 7	0243 1.1	27.403	-112.494	6.7	0.00	1.8
49	2006 8 7	0244 46.2	27.399	-112.491	12.5	0.10	1.5
50	2006 8 7	0249 50.2	27.397	-112.494	6.8	0.00	1.4
51	2006 8 7	0250 54.0	27.402	-112.485	6.7	0.00	1.2
52	2006 8 7	1522 31.3	27.409	-112.491	6.8	0.00	1.3
53	2006 8 7	1712 39.5	27.406	-112.496	6.9	0.00	1.3
54	2008 622	0253 13.4	27.521	-112.556	5.5	0.00	1.4
55	2008 712	1043 24.2	27.491	-112.590	5.4	0.00	1.7
56	2008 8 2	0052 18.4	27.521	-112.551	5.1	0.00	0.7
57	2008 8 9	2154 12.0	27.525	-112.535	4.1	0.00	1.4
58	2008 811	1321 16.2	27.450	-112.560	6.5	0.00	1.6
59	2008 816	0003 54.3	27.509	-112.590	3.0	0.00	1.2
60	2008 820	2116 15.5	27.444	-112.526	6.8	0.10	1.0
61	2008 827	1332 53.5	27.450	-112.561	6.8	0.00	1.7
62	2008 828	1106 19.9	27.600	-112.548	8.4	0.00	1.7
63	2008 9 3	1147 48.9	27.523	-112.564	4.9	0.10	0.9
64	2008 9 7	0151 17.6	27.524	-112.579	5.8	0.00	1.6
65	2008 913	0037 17.0	27.589	-112.551	9.0	0.00	1.2
66	2008 1015	2155 4.6	27.538	-112.551	3.7	0.00	2.1
67	2008 1024	0426 48.3	27.549	-112.479	4.4	0.00	1.5
68	2009 4 1	1327 52.9	27.406	-112.509	6.2	0.00	1.8
69	2009 421	1019 6.7	27.365	-112.597	6.0	0.00	2.3
70	2009 5 6	1830 25.7	27.356	-112.499	5.4	0.00	2.0
71	2009 5 6	1937 29.9	27.349	-112.503	5.3	0.00	2.4
72	2009 6 2	1435 40.3	27.490	-112.586	5.0	0.00	1.1
73	2009 6 2	1440 48.9	27.497	-112.581	5.1	0.10	1.1
74	2009 6 2	1441 33.9	27.485	-112.592	4.8	0.10	0.8
75	2009 6 5	1022 19.6	27.347	-112.521	8.3	0.00	1.9
76	2009 6 5	1044 20.9	27.343	-112.515	9.2	0.00	2.3

## 105 Anexo A Tablas Hipocentrales

<b>Nº SISMO</b>	<b>FECHA AA/MM/DD</b>	<b>HORA GMT HH:MM:SS</b>	<b>LATITUD (Grados)</b>	<b>LONGITUD (Grados)</b>	<b>PROF (km)</b>	<b>RMS (Km)</b>	<b>Md (Grado)</b>
77	2009 6 5	1047 5.1	27.347	-112.520	5.9	0.00	2.0
78	2009 6 5	1140 12.8	27.349	-112.528	5.8	0.00	2.0
79	2009 6 5	1600 21.9	27.349	-112.515	5.6	0.00	1.6
80	2009 6 5	1833 31.1	27.341	-112.522	8.7	0.00	1.2
81	2009 6 10	1403 50.7	27.353	-112.528	6.0	0.00	1.8
82	2009 6 10	1723 53.9	27.346	-112.521	5.6	0.00	1.6
83	2009 6 12	0106 9.0	27.438	-112.579	7.0	0.00	1.7
84	2009 6 12	1913 4.9	27.502	-112.593	4.5	0.00	0.8
85	2009 6 20	2042 41.8	27.519	-112.590	1.8	0.00	1.4
86	2009 6 28	0205 15.7	27.405	-112.582	6.3	0.00	0.7
87	2009 7 3	1952 36.9	27.483	-112.572	6.2	0.10	1.6
88	2009 7 19	0500 30.8	27.518	-112.589	5.4	0.00	1.5
89	2009 7 24	2121 52.9	27.528	-112.581	6.0	0.00	1.0
90	2009 9 28	1651 21.4	27.517	-112.556	5.5	0.00	1.8
91	2009 10 1	1818 51.6	27.581	-112.549	8.2	0.00	1.6
92	2009 10 3	0104 18.5	27.597	-112.648	6.6	0.00	1.7
93	2009 10 7	1830 24.5	27.551	-112.536	2.0	0.10	1.9
94	2009 10 9	1813 8.4	27.479	-112.596	0.6	0.10	2.2
95	2009 10 10	1239 43.9	27.454	-112.635	2.8	0.00	1.9
96	2009 10 16	1117 22.8	27.436	-112.639	0.9	0.10	1.7
97	2009 10 18	0635 2.8	27.396	-112.532	5.9	0.00	2.0
98	2009 10 19	0051 56.4	27.504	-112.592	4.6	0.00	1.8
99	2009 10 22	1336 12.2	27.318	-112.511	7.9	0.10	1.9
100	2009 10 22	1718 35.4	27.519	-112.554	5.3	0.00	2.1
101	2009 11 15	1619 27.7	27.496	-112.562	4.0	0.00	1.2
102	2009 11 23	0809 39.0	27.511	-112.560	4.7	0.00	0.6
103	2009 11 25	1036 46.0	27.597	-112.540	9.8	0.00	0.8
104	2009 11 26	0238 30.4	27.565	-112.478	10.3	0.00	1.0
105	2009 11 26	0323 15.0	27.567	-112.476	10.3	0.00	1.4
106	2009 11 27	2052 42.6	27.461	-112.428	6.6	0.00	1.4
107	2009 12 4	1318 18.3	27.527	-112.580	5.1	0.00	0.5
108	2009 12 4	1320 26.1	27.525	-112.579	5.2	0.00	0.3
109	2009 12 5	1554 46.1	27.479	-112.452	6.6	0.00	1.4
110	2009 12 16	1254 39.4	27.521	-112.563	5.0	0.00	2.0
111	2009 12 16	1406 12.3	27.522	-112.568	4.9	0.00	2.0
112	2009 12 16	1435 14.3	27.519	-112.564	5.0	0.00	1.6
113	2009 12 19	1715 52.6	27.502	-112.572	3.2	0.00	1.5
114	2009 12 19	1717 3.5	27.504	-112.570	3.7	0.00	1.7
115	2009 12 19	1717 3.5	27.501	-112.571	3.1	0.00	1.5
116	2009 12 21	1718 49.8	27.506	-112.566	3.9	0.10	1.1
117	2009 12 25	2135 53.6	27.501	-112.571	2.6	0.00	1.9

**Anexo A Tablas Hipocentrales 106**

<b>Nº SISMO</b>	<b>FECHA AA/MM/DD</b>	<b>HORA GMT HH:MM:SS</b>	<b>LATITUD (Grados)</b>	<b>LONGITUD (Grados)</b>	<b>PROF (km)</b>	<b>RMS (Km)</b>	<b>Md (Grado)</b>
118	2009 12 25	537 31.2	27.479	-112.620	6.1	0.00	1.7
119	2009 12 25	1233 10.1	27.502	-112.571	3.1	0.00	1.8
120	2009 12 25	1256 6.4	27.502	-112.572	2.9	0.00	1.2
121	2009 12 25	1256 6.4	27.503	-112.571	3.2	0.00	1.9
122	2009 12 25	1610 59	27.502	-112.571	3.2	0.00	1.3
123	2009 12 25	1634 17	27.506	-112.576	3.0	0.00	1.5
124	2009 12 26	137 5.8	27.500	-112.572	2.9	0.00	1.3
125	2009 12 26	1509 51.9	27.484	-112.592	4.2	0.00	1.8

## 5. Referencias

- 1 Aguilar A., Áreas para la exploración en los alrededores del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC., *Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 22, No. 2, p 2-10, 2009.
- 2 Antayhua, Y., 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., 2007.
- 3 Arellano, M., García, A, Barragán M.R., Izquierdo, G., Aragón, A., y Pizano, A., Distribución inicial de presión y temperatura del campo geotérmico de Los Humeros. *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas-Comisión Federal de Electricidad*, p 450, 2000.
- 4 Camacho, F., Geología de la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán., Comisión Federal de Electricidad, México, *Reporte Interno. 6/79*, 41 p, 1979.
- 5 Cedillo, F., Geología del subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Comisión Federal de Electricidad-Gerencia de Proyectos Termoeléctricos, Residencia Los Humeros. *Informe HU/RE/03/97*, 1997.
- 6 Cedillo, F., Hydrogeological model of the geothermal reservoirs from Los Humeros, Puebla, Mexico. *Proceeding World Geothermal Congress Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10. 2000.*
- 7 Chavacán, M., Lermo, J. y Quintanar, L. Determinación de una escala de magnitud para temblores corticales en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano, 2004.
- 8 COMESA, Informe sismológico final (Vibrosismo). Sísmica 2D. Campo geotérmico de Los Humeros. Informe: RHU-002/98., 1998.

## 89 5 Referencias

---

- 9 Fabriol H., y Munguía L., 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, 1997.
- 10 Lermo, J., Bernal I., Antayhua, Y., Chavacán, M., y Vega, D., Estudio de actividad sísmica en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla. Comisión Federal de Electricidad, gerencia de proyectos termoeléctricos-departamento de exploración. *Informe Técnico GF-ACO-02-04*. 81 pp., 2004.
- 11 Lee, W.H.K., R.E. Bennett y K.L. Meagher, A method of estimating magnitude of local earthquakes from signal duration, *Geological Survey Open-File Rep (EUA)*, 1972.
- 12 Lermo J., Lorenzo, C., Espitia G., y Antayhua, Y., Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Instrumentación y operación de la Red Sismológica. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Termoeléctricos-Departamento de Exploración. *Informe Técnico: GF-HU-01-05*, p 35, México, 2005.
- 13 Lermo, J., Antayhua Y., Quintanar L., y Lorenzo C., 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, 2008.
- 14 Lermo, J., Romero F., Antayhua Y., Bernal I., Vega D. y Chavacán M., 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, 2004.
- 15 Lippmann M, Truesdell A., Halfman S., y Mañon, A, A Review of the Hydrogeologic-Geochemical Model for Cerro Prieto, *Geothermics*, Vol. 20, p 39–52. 1991.

- 16 López, H., García, H., y Arellano, G. Geological and geophysical studies at Las Tres Virgenes, B.C.S., Mexico, *Geothermal Resources Council 18*, 275-280, 1995.
- 17 Garduño-Monroy, V.H., La caldera de Los Azufres y su relación al sistema regional E-W. Geotermia, *Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 4, p 49-61, 1988.
- 18 GeothermEx, Actualización del modelo conceptual y numérico del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, México, Informe para la Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Generación, Morelia, Mich, 2003.
- 19 Ghassemi A. y Zhang Q., Poro-Thermoelastic mechanism in wellbore stability and reservoir stimulation, Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2004.
- 20 Glowaka E., Sarychikhina O. y Nava F.A., Subsidence and Stress Change in the Cerro Prieto Geothermal Field, B. C., Mexico. CICESE, 2005.
- 21 Glowacka E., y Nava F., Major Earthquakes in Mexicali Valley, Mexico, and Fluid Extraction at Cerro Prieto Geothermal Field, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, p 96-105, 1996.
- 22 Havskov, J. y Ottemoller, L., SEISAN The earthquake analysis software. Versión 8.0. *Preliminary*. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Bergen, Norway. 250 p, 2009.
- 23 Hernández P., Sánchez M, Gómez G., y Tapia R., Informe final de resultados de la perforación y estimulación acida del pozo LV-06, *Informe elaborado para la Gerencia de proyectos Geotermoeléctricos*, 2010.

## 91 5 Referencias

---

- 24 Herrera L., Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC., *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 18, No. 1, 2005.
- 25 Mungía, L., y Wong, V., Estudio de sismicidad en la zona geotérmica las Tres Vírgenes, Baja California Sur. En: Medina-Martínez, F., Delgado-Argote, L.A., 1995.
- 26 Negrín L. y Quijano J. Update of geothermics in Mexico. / *World Geothermal Congress 2005*, 2005.
- 27 Phillips, S. W., Rutledge, T., House, L. S., and Fehler, M.C., Induced Microearthquake Patterns in Hydrocarbon and Geothermal Reservoirs: Six Case Studies. *Pure and App. Geophys.*, Vol. 159, p 345-369, 2002.
- 28 Quijano J., Manual de Geotermia, Manual elaborado para la Asociación Mexicana de Geotermia, 2007.
- 29 Rebollar J., Reyes L., Quintanar L., y Arellano J., Strees Heterogeneity in the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, p 783-794, 2003.
- 30 Rodríguez, M., Cuenca, J., y Gómez, G., Estudio de la Actividad Sísmica del Campo Geotérmico de los Azufres, Michoacán. *Reporte elaborado para Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos*, 2001.
- 31 Rodríguez, M., 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*, Instituto de Ingeniería, UNAM, 2000.



- 32** Romero, Ó., Actualización del modelo geoquímico de Los Humeros, Puebla, México, *Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 19, No. 1, p 23-33, 2009.
- 33** Suárez-Reynoso,G., La sismología en México: 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 (M=8.1). *Unión Geofísica Mexicana, Monografía No.2*, 212-228.
- 34** Suarez M.C., La termoporoelasticidad en geotérmica formulada en cuatro dimensiones, *Congreso Anual 2009*, Asociación Geotérmica Mexicana, 2009.
- 35** Valdez C., Estudio de sismica pasiva en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., *Informe elaborado para la Comisión Nacional de Electricidad*, DEX-DGF-AZ-16-09, Instituto de Geofísica, UNAM, 2009.
- 36** Wong, V., Rebollar, C. y Murguía, L., Attenuation of Coda Waves at Tres Vírgenes Volcanic Area, Baja California Sur, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 4, pp. 683-693, 2001.
- 37** Zhou X., Ghassemi A.,y Cheng A., A three-dimensional integral equation model for calculating poro and thermoelastic stresses induced by cold water injection into a geothermal reservoir, *International Journal for numerical and analytical methods in Geomechanics*, Vol. 33, p. 1613-1640, 2009.