

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra con orientación en Sismología**

**Estudio de microsismicidad en la caldera La Reforma
del complejo volcánico Las Tres Vírgenes,
Baja California Sur, México.**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Jhon Leandro Pérez

Ensenada, Baja California, México
2017

Tesis defendida por

Jhon Leandro Pérez

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Efraín Gómez Arias
Director de tesis

MC. José Guadalupe Acosta Chang

Dr. José Luis Ochoa de la Torre



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la
Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Jhon Leandro Pérez © 2017

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Jhon Leandro Pérez** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Sismología.

**Estudio de microsismicidad en la caldera La Reforma del complejo volcánico Las Tres Vírgenes,
Baja California Sur, México.**

Resumen aprobado por:

Dr. Efraín Gómez Arias
Director de tesis

Se realizó un estudio de microsismicidad en la caldera La Reforma del Complejo Volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV), Baja California Sur, México, con el objetivo de verificar y localizar la actividad microsísmica, y establecer si existe una posible relación entre la actividad sísmica registrada con un posible escenario geotérmico. Para este fin, se instalaron dos redes sísmicas temporales para la adquisición de los datos. La primera entre septiembre y octubre de 2015 conformada por 5 estaciones sísmicas con la cual se logró cubrir un 30% de la caldera; y la segunda entre abril y mayo de 2016 con 10 estaciones sísmicas que cubrieron la caldera. De las dos campañas realizadas se obtuvo un catálogo sísmico con 38 eventos registrados en la zona, con magnitudes entre 0.8 y 2.9 Mc, y profundidades de 1 a 12 km (involucrando las incertidumbres). También fueron determinados el mecanismo focal de 20 microsismos de mejor localización, de los cuales se obtuvieron 4 soluciones de falla normal y 6 normales con componente lateral, 4 inversos y 6 inversos con componente lateral, estas soluciones de plano de falla posiblemente pueden estar asociados a pequeñas fallas o fracturas que no han sido identificadas hasta el momento en la zona de estudio. Por otra parte, del análisis de las señales de los eventos registrados, se define que el ancho de banda en frecuencias es de 4 Hz a 17 Hz y las amplitudes máximas o frecuencias dominantes están entre 6 y 15 Hz; respecto a la génesis de estos eventos, se sugiere que pueden obedecer a la actividad de la tectónica local. Finalmente, con base a la distribución en profundidad del conjunto de los eventos, se observa un posible límite a 7-8 km de profundidad a partir del cual disminuye la ocurrencia de estos, y a partir de un perfil térmico modelado bajo el subsuelo de la caldera, pudiera existir la presencia de una zona de Transición Frágil-Dúctil (TFD) entre 4.8 y 8.0 km de profundidad con temperaturas entre 300 y 450°C.

Palabras claves: Microsismicidad, Catálogo Sísmico, Caldera La Reforma, Exploración Geotérmica.

Abstract of the thesis presented by **Jhon Leandro Pérez** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Seismology.

**Microseismic study at the caldera La Reforma from Las Tres Vírgenes volcanic complex,
Baja California Sur, Mexico.**

Abstract approved by:

Dr. Efraín Gómez Arias
Thesis Director

A microseismic study was carried at the caldera La Reforma, located in Las Tres Vírgenes Volcanic Complex (LTVVC), Baja California Sur, México, in order to verify and locate the microseismic activity. This study would help to link a possible relationship between the seismic activity and the feasibility of a geothermal potential. Overall, the project involved two (campaigns) temporary seismic networks. The first one took place from September to October, 2015, in which 5 seismic stations were used, reaching up about approximately 30 percent of the caldera. The second took place from April to May, 2016, with 10 seismic stations that covered almost the whole area of the caldera. From the two campaigns, a seismic catalog with 38 registered events was obtained with magnitudes between 0.8 and 2.9 (Mc), and depths between 1 and 12 km (taking into account the uncertainties). Also, the focal mechanisms of 20 events were calculated; these were the best localized microseisms from which 4 normal faults were found, 6 oblique-slip normal faults, 4 reverse faults and 6 oblique-slip reverse faults, these solutions can possibly be associated to small faults or fractures that not been identified yet in the area of study. On the other hand, from analyzing the time series from the registered events, it was defined that its bandwidth is between 4 Hz and 17 Hz and that the peak amplitude is between 6 and 15 Hz, in this matter it is suggested that the origin of such events might be due to local tectonic activity. Finally, according to the depth distribution of the events set, it is possible to see a threshold up to 7 to 8 km from which the occurrence of seismic events diminishes. Moreover, from a 1D simulated thermal profile under the, a Brittle–Ductile Transition (BDT) zone between 4.8 and 8.0 km of depth, with temperatures occurring between 300°C and 450°C has been proposed.

keywords: Microseismic, Seismic catalogue, La Reforma Caldera, Geothermal exploration

Dedicatoria

A la salud y bienestar de México

*Al hermoso territorio y biodiversidad de la península de Baja
California*



Caldera La Reforma, Las Tres Vírgenes, Baja California Sur.

Agradecimientos

Agradezco al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), en especial a la División de Ciencias de la Tierra (CT), que por medio de su programa educativo me permitió realizar mis estudios de Maestría. Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de estudios de posgrado que me otorgó con número de registro de becario 570794. Este trabajo de investigación fue posible desarrollar gracias al financiamiento y apoyo por parte del proyecto “P03-Campaña Intensiva de Exploración Geotérmica de las Cuencas Wagner, Consag, Delfín, Guaymas y Alarcón del Sistema de Rifts del Golfo de California” (responsable Dr. Antonio González Fernández) adscrito al Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo).

Agradezco especialmente a mi director de tesis el Dr. Efraín Gómez Arias por su invaluable labor como maestro, ser humano y asesor de mi tesis, quien contribuyo de manera significativa con mi desarrollo académico, intelectual y personal. También a mis sinodales el M.C José Acosta Chang y el Dr. José Ochoa de la Torre por sus valiosos aportes al desarrollo de este trabajo.

Agradezco a la planta académica del Departamento de Sismología por transmitirme selectos conocimientos a través de los cursos, así como a los demás investigadores de las otras orientaciones de CT que por medio de consultas y seminarios, contribuyeron a complementar mi formación. Gracias al personal administrativo de la División de CT y del Departamento de Servicios Escolares por su gran vocación de atención al estudiante.

En el trabajo de laboratorio, agradezco el apoyo de M.C Euclides Ruiz y M.C Gustavo Arellano del laboratorio de Procesamiento de datos de sismología aplicada a la ingeniería, así como a todo el personal técnico de la Red Sísmica del Noreste de México (RESNOM).

Un afectuoso agradecimiento a mi madre, mis tías y hermana, que a pesar de la distancia, siempre me transmitieron su apoyo y fueron mi motor para continuar hasta el final en esta travesía.

Por último y no menos importante, agradezco el apoyo moral de mis compañeros: Mayra, Thalia, German, Luis, Radha, Javier, Rogelio, Valeria, Yadira, Mariana, Manuel y muchos más que no alcanzo a nombrar.

Tabla de contenido

Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	ix
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Escenario geotérmico en México.....	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Área de estudio	7
1.3.1. Complejo Volcánico Las Tres Vírgenes (CVLV)	7
1.3.2. Ambiente tectónico y geología regional	8
1.3.3. Caldera La Reforma.....	10
1.4. Justificación.....	13
1.5. Objetivos	14
1.5.1. Objetivo General	14
1.5.2. Objetivos específicos	14
Capítulo 2. Metodología	15
2.1. Sismología	15
2.1.1. Red sísmica.....	15
2.1.2. Equipos.....	17
2.1.3. Bases de datos	19
2.1.4. Procesamiento	19
2.1.4.1. Localización de eventos	19
2.1.4.2. Mecanismos Focales	21

2.1.4.3. Análisis de señales	23
2.2. Modelado Térmico	26
2.2.1. Hipótesis.....	26
2.2.2. Ecuación de transferencia de calor.....	27
2.2.3. Modelado	30
Capítulo 3. Resultados y Discusión	33
3.1. Sismología	33
3.1.1. Primera campaña.....	33
3.1.2. Segunda Campaña	35
3.1.3. Catálogo de eventos	38
3.1.4. Análisis de la sismicidad de la caldera La Reforma y Las Tres Vírgenes.....	42
3.1.5. Mecanismos focales.....	46
3.1.6. Análisis de señales	50
3.2. Modelado térmico	53
3.2.1. Validación.....	53
3.2.2. Modelado térmico en la caldera La Reforma.....	57
Capítulo 4. Conclusiones y Recomendaciones	59
Literatura citada	61
Anexos	66

Lista de figuras

Figura		Página
1	Distribución espacial de sismos en el campo Las Tres Vírgenes, 2004-2009 (modificado de Urbán-Rascón, 2010).	3
2	Sismicidad del campo geotérmico Cerro Prieto. Los triángulos negros corresponden a las estaciones sísmicas; los círculos negros con estrellas a las estaciones acelerográficas; y los puntos blancos a los pozos de inyección (modificado de Fabriol y Munguía, 1997).	4
3	Localización del área de estudio. a) Ubicación del estado de Baja California Sur; b) localización del Complejo Volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV) señalado en el recuadro morado (modificado de Tello-Hinojosa et al., 2005).	7
4	Mapa general de unidades geológicas del complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV). Este mapa muestra el contraste y cobertura de los productos volcánicos debido a erupciones explosivas (piroclastos) y efusivas (lavas) en la zona (modificado de Schmitt et al., 2006).	9
5	Fallas y estructuras volcánicas principales del complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV). El rectángulo en rojo corresponde al área del campo geotérmico.	10
6	Mapa de unidades geológicas de la caldera La Reforma (modificado de Dmochowski, 2005).	12
7	Red sísmica temporal de la primera campaña. Los triángulos rojos corresponden a las estaciones sísmicas, las líneas negras a fallas y fracturas.	16
8	Red sísmica temporal de la segunda campaña. Los triángulos naranja corresponden a las estaciones sísmicas, las líneas negras a fallas y fracturas.	16
9	Ubicaciones de estaciones sísmicas de la primera campaña (triángulos rojos) y segunda campaña (triángulos naranja).	17
10	Instrumentación usada.	17
11	Respuesta de amplitud del SARA para una mínima frecuencia de muestreo de 100 mps.	18
12	Ejemplo sismograma y lectura de P, S y Coda del evento registrando por 4 estaciones en septiembre 16 de 2015 a las 02:50 UTC.	20
13	Primer arribo de P observado en diferentes direcciones relativas para una falla de deslizamiento (modificado de Havskov y Ottemöller, 2010).	22
14	Esfera focal en el hemisferio inferior dividida en 4 partes (modificado de Havskov y Ottemöller, 2010).	22
15	Geometría de falla (modificado de Havskov y Ottemöller, 2010).	22

Figura		Página
16	Ejemplos de diferentes orientaciones de fallas respecto a la superficie del terreno con sus correspondientes nombres (modificado de USGS, 2016).	23
17	Tipos de señales sísmicas en estructuras volcánicas, formas de onda a la izquierda (componente vertical de un sismógrafo) y sus respectivos espectros de Fourier a la derecha. Evento volcano-tectónico (VT); híbrido o multifase (MP); largo periodo (LP); Tremor (TR) (Modificado de Zobin, 2012).	25
18	Esquema del modelo reológico de la corteza (izquierda) relacionado con un perfil geotérmico de una estructura volcánica (derecha) (modificado de Scholz, 1988 y Suzuki et al., 2014).	26
19	Esquema general de comportamiento térmico de la Tierra (modificado de Francis, 1993).	28
20	Esquema general del método de discretización mediante volúmenes de control (modificado de Versteeg y Malalasekera, 1995).	29
21	Aplicación del TDMA para resolver el sistema de ecuaciones del ejemplo de los 5 volúmenes de control (modificados de Versteeg y Malalasekera, 1995).	30
22	Esquema simple del modelo conceptual litológico de la caldera La Reforma (modificado de Vargas-Ledezma y Garduño-Monroy, 1988).	31
23	Distribución espacial de los eventos (círculos naranja) y errores de localización (barras de color morado). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas. Las líneas rojas representan los perfiles en dirección sur-norte y oeste-este. Las líneas negras corresponden a fallas y fracturas.	34
24	Distribución de los eventos en profundidad (círculos naranja). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas, y las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) a los errores de localización.	34
25	Distribución de los eventos en profundidad (círculos naranja). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas, y las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) a los errores de localización.	35
26	Distribución espacial de los eventos (círculos morados) y errores de localización (barras en morado). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas. Las líneas rojas representan los perfiles en dirección sur-norte y oeste-este. Las líneas negras corresponden a fallas y fracturas.	37
27	Distribución de los eventos en profundidad (círculos morados). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas, y las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) a los errores de localización.	37
28	Distribución de los eventos en profundidad (círculos morados). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas, y las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) a los errores de localización.	38

Figura		Página
29	Localización de los eventos en la caldera La Reforma del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes. Los círculos de color naranja corresponden a los eventos registrados durante la primera campaña y los de color morado a los eventos de la segunda campaña. Las barras en color morado corresponden a los errores de localización.	40
30	Distribución de eventos en profundidad. Los círculos en color naranja corresponden a los eventos de la primera campaña y los morados a los eventos de la segunda campaña. Las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) corresponden a los errores de localización.	41
31	Distribución de eventos en profundidad. Los círculos en color naranja corresponden a los eventos de la primera campaña y los morados a los eventos de la segunda campaña. Las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) corresponden a los errores de localización.	41
32	Localización de eventos en el Complejo Volcánico Las Tres Vírgenes. Los puntos en color morado corresponden a los eventos del catálogo de la caldera La Reforma, los azules de Macías-Carrasco (1997), los amarillos de catálogo de Wong (2000) y los rojos de Jiménez-Méndez (2015). A-A' y B-B' son perfiles definidos con un ancho de 2 km y las líneas negras corresponden a fracturas y fallas.	42
33	Distribución de eventos en profundidad. Los puntos en color morado corresponden a los eventos del catálogo de la caldera La Reforma, los azules de Macías-Carrasco (1997), los amarillos de catálogo de Wong (2000) y los rojos de Jiménez-Méndez (2015). Las barras horizontales y verticales en color negro corresponden a los errores de localización.	45
34	Distribución de eventos en profundidad. Los puntos en color morado corresponden a los eventos del catálogo de la caldera La Reforma, los azules de Macías-Carrasco (1997), los amarillos de catálogo de Wong (2000) y los rojos de Jiménez-Méndez (2015). Las barras horizontales y verticales en color negro corresponden a los errores de localización.	45
35	Mecanismos focales de los eventos seleccionados. Los puntos de color morado corresponden a la localización de los microsismos y las “bolas de playa” a su mecanismo focal, los de color negro corresponden a los eventos someros y en naranja a los profundos (>3 km).	49
36	Ejemplo de la serie de tiempo y espectro de Fourier de eventos de la campaña 1 (a) y la campaña 2 (b).	50
37	Conjuntos de espectros normalizados de los eventos registrados en la caldera La Reforma.	51
38	Ejemplo de señales reportadas en este trabajo respecto a las reportadas en la literatura. Señal de la campaña 1 (a) y campaña 2 (b).	52
39	Registro de temperaturas en el pozo LV-3 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes.	53
40	Registro de temperaturas en el pozo LV-4 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes.	54

Figura		Página
41	Litología de los pozos LV-3 y LV-4 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes (modificado de CFE, 1994 y Viggiano-Guerra et al., 2009).	54
42	Comparación entre las temperaturas simuladas con las registradas en los Pozos LV-3 y LV-4 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes.	56
43	Comportamiento térmico de los 5 modelos propuestos para un tiempo de simulación de 1Ma (posible comportamiento térmico actual).	58

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Modelo de velocidades obtenido de la inversión de curvas de dispersión.	5
2	Coordenadas de las estaciones de la primera campaña.	16
3	Coordenadas de las estaciones de la segunda campaña.	16
4	Especificaciones generales del equipo.	18
5	Modelo de velocidad de corteza para Las Tres Vírgenes (Macías-Carrasco 1997).	19
6	Condiciones iniciales y de frontera para la modelación térmica en la caldera La Reforma.	31
7	Unidades litológicas y sus propiedades termofísicas.	32
8	Características generales de los eventos registrados durante la primera campaña (septiembre-octubre de 2015).	33
9	Características generales de los eventos registrados durante la segunda campaña (abril-mayo de 2016).	36
10	Catálogo de eventos sísmicos de la caldera La Reforma del Complejo Volcánico y Las Tres Vírgenes.	39
11	Eventos de la caldera La Reforma para el perfil A-A'.	43
12	Eventos de la caldera La Reforma para el perfil B-B'.	43
13	Solución de mecanismos focal para eventos seleccionados de la caldera La Reforma.	48
14	Comparación entre las temperaturas simuladas (temperatura de emplazamiento de la cámara magmática de 1300, 1200, 1100 y 1000°C) y las temperaturas registradas en el pozo LV-3 a diferentes profundidades. ΔT es el error de ajuste (°C).	56
15	Comparación entre las temperaturas simuladas (temperatura de emplazamiento de la cámara magmática de 1300, 1200, 1100 y 1000°C) y las temperaturas registradas en el pozo LV-4 a diferentes profundidades. ΔT es el error de ajuste (°C).	57

Capítulo 1. Introducción

1.1. Escenario geotérmico en México

Actualmente México ocupa el cuarto lugar en el mundo en producción de energía eléctrica a partir de geotermia con 1.017 MWe de capacidad instalada (839 MWe en ejecución) que representa el ~2% de la generación de energía eléctrica del país (Bertani, 2016) y que se distribuye en cinco campos geotérmicos en funcionamiento: 1) Cerro Prieto, Baja California, con una producción de 720 MWe, a partir de fluidos almacenados en areniscas terciarias; 2) Los Azufres, Michoacán, con una producción de 194 MWe a partir de fluidos geotérmicos almacenados en roca andesita del Mioceno-Plioceno; 3) Los Hornos, Puebla, con una producción de 93 MWe, su yacimiento se aloja en andesitas terciarias; 4) Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, con una producción de 10 MWe, cuyo yacimiento geotérmico se encuentra alojado en granodioritas (Gutiérrez-Negrín y Quijano-León 2005; Maya-González y Gutiérrez-Negrín, 2007); y 5) San Pedro en Tepic, Nayarit, con 10 MWe de producción, administrado por la empresa privada del grupo Dragón.

De acuerdo al nuevo marco regulatorio energético en el país y a la creación del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo) se busca impulsar el incremento de la producción de la energía eléctrica a través de la localización de nuevos yacimientos geotérmicos e identificar nuevas zonas de explotación en los campos activos y/o de sistemas geotérmicos mejorados (Romo-Jones y grupo CeMIE-GEO, 2015). En este sentido, los métodos geofísicos son imprescindibles en los estudios de exploración geotérmica.

1.2. Antecedentes

A nivel mundial los estudios de sismología pasiva en diferentes zonas volcánicas y/o geotérmicas han demostrado que la sismicidad puede estar asociada a la actividad tectónica (local y regional), a la dinámica de fluidos como agua y vapor (en el subsuelo) y movimiento de magma (a mayores profundidades). La sismicidad en zonas geotérmicas permite identificar, por ejemplo: trayectoria de fallas activas; zonas permeables en fallas o fracturas (cuando existen manifestaciones hidrotermales en superficie); y localizar en profundidad el posible límite entre las zona frágil y dúctil de la corteza, a partir del cual la sismicidad tiende a disminuir drásticamente por el incremento de la temperatura (>400°C) debido a su cercanía con una fuente de calor primaria (Munguía y Wong, 1993; Wong, 2000; Tanaka, 2004).

En el caso de los campos geotérmicos de México, en las últimas décadas, la instrumentación sísmica en estos lugares se ha enfocado principalmente al monitoreo de la sismicidad relacionada con los procesos de explotación de yacimientos. Por ejemplo, en Los Humeros desde 1997 hasta 2008, se identificó que la mayoría de la sismicidad se concentra en las fallas alrededor de los pozos de inyección, sugiriendo que la actividad sísmica ocurrida, se debe al proceso de reinyección de agua al subsuelo (Lermo-Samaniego *et al.*, 2008). Un estudio realizado sobre atenuación de ondas coda en el mismo campo a partir de los registros de sismicidad, muestra que los valores bajos de Q_c fueron observados en la zona de mayor actividad sísmica y en la ubicación de pozos productores y reinyectores, mientras que los valores altos se observaron en la periferia del campo geotérmico (Antayhua-Vera *et al.*, 2008). También se hizo tomografía 2D y 3D de la atenuación (Q_c^{-1}) donde se concluye que la distribución de ésta parece evidenciar una relación entre zonas de alta atenuación con zonas de alta temperatura. Por lo tanto, según este estudio, hecho fuera de la zona conocida de explotación actual, las zonas de alta atenuación sísmica podrían indicar zonas de interés que convendría explorar con nuevos pozos geotérmicos (Antayhua-Vera *et al.*, 2008).

En el campo geotérmico de Los Azufres, la sismicidad analizada durante los años 2008 y 2009, muestra numerosos eventos próximos a los pozos de inyección y ninguno a pozos productores. En los mismos datos se observó sismicidad asociada con rasgos estructurales como las Fallas La Cumbre y El Chino (Urbán-Rascón, 2010; Urbán-Rascón y Lermo-Samaniego; 2012). En el Campo geotérmico Las Tres Vírgenes, la sismicidad analizada desde 2004 hasta 2009, muestra evidencia de la relación de la actividad sísmica con las pruebas de estimulación y producción de los dos últimos pozos de desarrollo (LV6 y LV8) y con el sistema tectónico regional correspondiente a las fallas La Virgen (F. Vi), El Volcán (F. Vol), El Partido (F. P), El Azufre (F. A) y El Cimarrón (F. C) (Figura 1; Urbán-Rascón, 2010). Estos resultados fueron corroborados por Antayhua-Vera *et al.*, (2015). Por último, en relación con el campo geotérmico de Cerro Prieto, la sismicidad se agrupa principalmente en la zona de explotación, a un kilómetro de profundidad de los sitios de producción y reinyección; en lo que se refiere a las estructuras geológicas, la actividad se ha observado cerca del sistema de fallas Morelia y Cerro Prieto (Urbán-Rascón, 2010; Urbán-Rascón y Lermo-Samaniego; 2012).

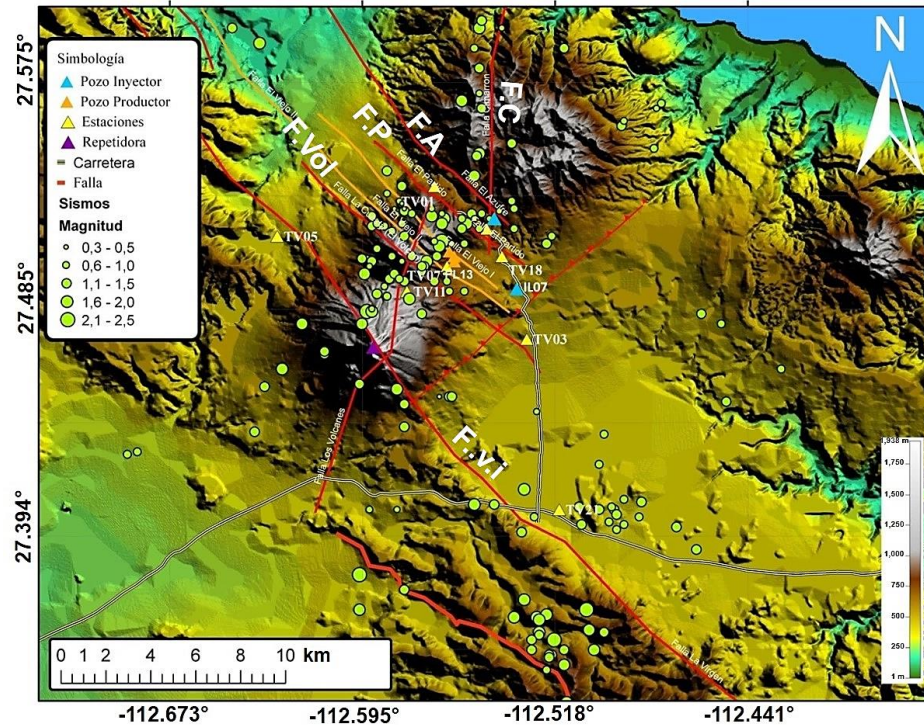


Figura 1. Distribución espacial de sismos en el campo Las Tres Vírgenes, 2004-2009 (modificado de Urbán-Rascón, 2010).

En la península de Baja California se han realizado los siguientes estudios de sismología pasiva con fines de exploración:

- 1) El de Cerro Prieto elaborado por el CICESE en 1979 (Reyes, 1979), para el cual se instaló una red local que permitió detectar la microsismicidad de la zona. Los resultados obtenidos sugieren que los enjambres sísmicos ocurren debido al ascenso y movimiento de fluidos magmáticos a lo largo de las zonas de falla de Cerro Prieto e Imperial y de acuerdo a la distribución de los epicentros se muestra un indicio de la fuerte relación tectónica entre estas fallas. Posteriormente, se realizaron otros trabajos como los de Majer *et al.*, (1980) que usó los datos de microsismicidad del estudio de CICESE para estimar valores de Poisson (en términos de la razón entre velocidades de las ondas P y S , α/β , obtenidas de diagramas de Wadati), dando como resultado valores de $\sigma=0.4$ que caracteriza el campo como un medio sedimentario y saturado de agua a lo largo de la zona de producción de 2 a 3 km de profundidad. Fabriol y Munguía (1997) realizaron un monitoreo continuo del campo geotérmico de Cerro Prieto entre agosto de 1994 y diciembre de 1995, investigando la sismicidad de origen tectónico y la provocada por las actividades de explotación (Figura 2), los resultados del análisis de mecanismos focales indican movimiento de desgarre lateral derecho para los sismos que ocurren en las fallas de Cerro Prieto e Imperial y propiamente en la zona geotérmica, también se registraron eventos con componentes de movimiento normales que tienen

explicación de acuerdo al régimen de esfuerzos tipo “pull-apart” o extensión de la cuenca entre ambas fallas. Otro aspecto importante de este estudio es que se manifiesta la posible relación entre la sismicidad y la explotación del campo, debido a la inyección de fluido en los pozos, sin embargo, para ese momento los autores no encontraron evidencias de que este tipo de actividad sea destructiva.

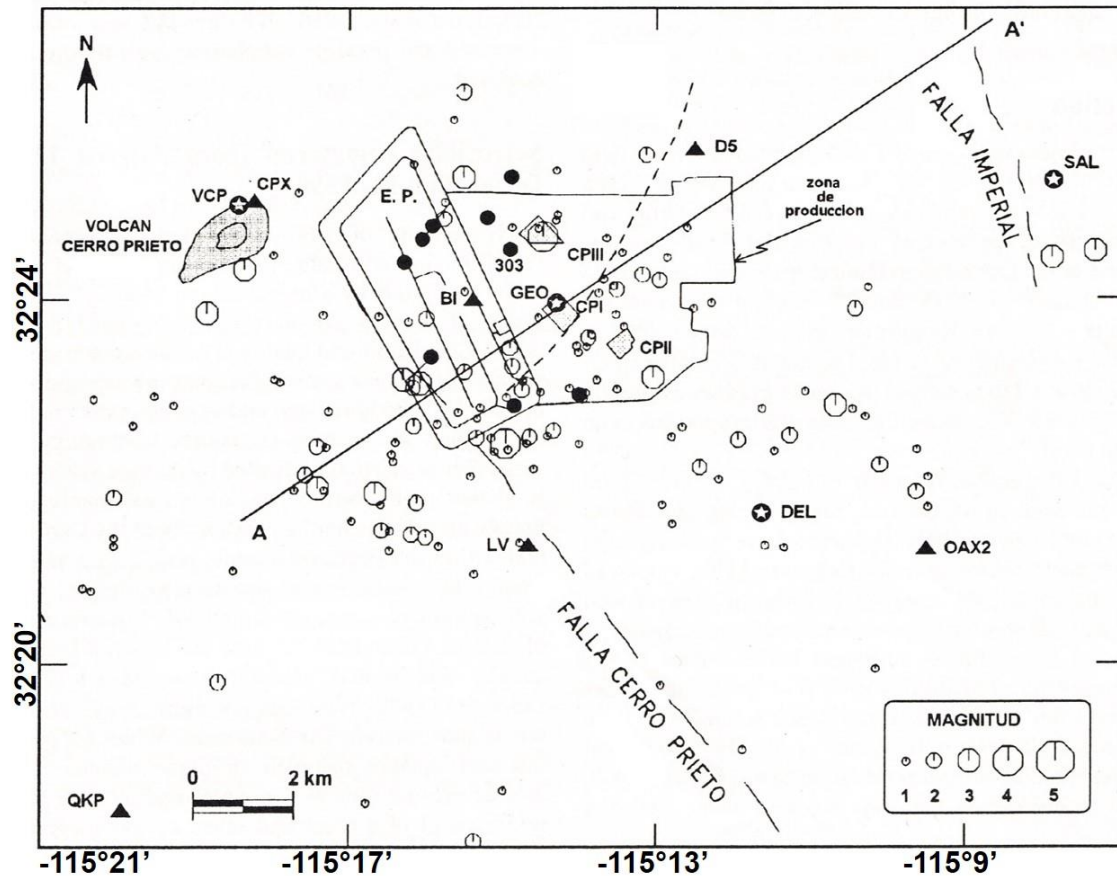


Figura 2. Sismicidad del campo geotérmico Cerro Prieto. Los triángulos negros corresponden a las estaciones sísmicas; los círculos negros con estrellas a las estaciones acelerográficas; y los puntos blancos a los pozos de inyección (modificado de Fabriol y Munguía, 1997).

2) En las Tres Vírgenes, Acosta *et al.* (2000) a partir de los datos adquiridos con un arreglo sísmico de pequeña apertura, realizaron un análisis espectral de los registros identificando la estructura somera bajo el arreglo y las velocidades de fase de ondas superficiales (posiblemente Rayleigh) propagándose a 500 y 1200 m/s. Además, obtuvieron un modelo de velocidades para una profundidad máxima de 700 metros (Tabla 1).

Tabla 1. Modelo de velocidades obtenido de la inversión de curvas de dispersión.

Espesor (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
0.038	0.6	0.39
0.204	1.6	1.12
0.697	4.5	2.19
--	5.2	3.10

Wong (2000) realizó un estudio de la actividad sísmica en los volcanes y la caldera El Aguajito del complejo volcánico Las Tres Vírgenes. El análisis indicó que los epicentros determinados definen tres zonas de actividad sísmica: 1) los tres volcanes (El Viejo, El Azufre y La Virgen), 2) la caldera El Aguajito, y 3) el lineamiento de la falla La Virgen. Los resultados muestran que los eventos localizados en las estructuras volcánicas ocurren principalmente por debajo de su cubierta granítica (espesor <2 km), con el 85% de los eventos se encuentran entre 3 y 7 km de profundidad. La ausencia de ocurrencia de eventos profundos en la zona, sugiere la presencia de un cuerpo de alta temperatura por debajo de 8 km de profundidad que podría ser la fuente de calor que alimenta la región geotérmica. Por otro lado, en este mismo trabajo fueron estimados los factores de calidad de las ondas coda $Q_c = (50.0 \pm 30.0) * f^{(0.65 \pm 0.02)}$, y de cuerpo $Q_p = (4.0 \pm 3.0) * f^{(0.97 \pm 0.29)}$ y $Q_s = (10.0 \pm 3.5) * f^{(1.04 \pm 0.14)}$, usando un modelo de dispersión simple y el método de razones espectrales, en un rango de frecuencias de 4 a 24 Hz. Los análisis de atenuación, mostraron que las ondas *P* tienen mayor atenuación que la de las ondas *S*, sugiriendo una corteza somera parcialmente saturada con fluidos. Debido a este comportamiento del medio, la onda *S* sigue propagándose pero a una baja velocidad, de ahí que su atenuación sea menor a la onda *P*.

3) Romo-Jones *et al.* (2000) y Wong *et al.* (2001), sugieren que la región de las Tres Vírgenes tiene presencia de rocas altamente fracturadas y de fluidos con temperaturas mayores de 240°C a profundidades entre 1.5 y 2.5 km, se observó que estas altas temperaturas pueden incrementar la conductividad eléctrica y la atenuación de las ondas sísmicas en la zona (Romo-Jones *et al.*, 2000). Posteriormente, Wong y Munguía (2006) complementaron el trabajo anterior con el análisis de relaciones de Poisson (σ), identificando de acuerdo a los valores obtenidos (0.22 a 0.26), saturación parcial de líquidos termales en los materiales de la zona de la caldera El Aguajito y en los volcanes El Viejo, El Azufre y La Virgen, además demostraron la correlación de la actividad hidrotermal con una tendencia bien definida de la actividad microsísmica en estos lugares. Las soluciones de mecanismos focales estimadas muestran predominantemente fallas de desgarre (dextral y sinistral) en dirección NNW-SEE con componente

normal, estos patrones de orientación de las fallas se deben al campo de esfuerzos relacionados con la evolución de la apertura del Golfo de California (Wong y Munguía, 2006).

4) Ortiz-Prieto y Lorenzo-Pulido (2009), a partir de la interpretación de los datos obtenidos en diversos monitoreos sísmicos realizados en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes y sus alrededores, establecieron que la sismicidad local se asocia a tres fuentes: 1) a las fallas La Virgen (particularmente en su extremo sureste) y El Azufre, 2) a la falla El Volcán, y 3) falla El Partido (Figura 2), que parece ser la más activa actualmente. Posteriormente, Lorenzo-Pulido y Soto-Peredo (2013) realizaron un análisis de sismicidad en los volcanes El Viejo, El Azufre y La Virgen, permitiendo relacionar la actividad sísmica con la actividad de un sistema hidrotermal de alta temperatura tomando como base la geología del subsuelo proporcionada por los pozos. Los sismos registrados se asocian con zonas permeables en el subsuelo debido a fallas geológicas o zonas de fracturamiento que puedan estar relacionadas con el yacimiento geotérmico. El análisis de la sismicidad demostró una tendencia en los eventos sísmicos que podrían estar relacionados con: a) una posible cámara magmática debajo de Las Tres Vírgenes, con una extensión de aproximadamente 13 km en dirección NE37°SW y forma de lacolito, localizada a una profundidad cercana a los 5 km, considerándose como la fuente de calor primaria; y b) a los sistemas estructurales activos de la zona y/o al campo geotérmico actualmente en explotación. Antayhua-Vera *et al.*, (2015) analizaron la sismicidad local de Las Tres Vírgenes entre 2003 y 2012 para establecer su distribución temporal y espacial, también analizaron las relaciones con los sistemas de fallas locales y regionales, inyección de agua y pruebas de producción de vapor. La sismicidad local tuvo un rango de magnitudes de duración (Mc) entre 0.1 y 2.9 con profundidades hipocentrales de 0.2 a 7.4 km en la parte central del campo geotérmico y hasta 11 km en la periferia. Los autores concluyen que la tectónica controlaría en general el vulcanismo, la actividad geotérmica y sísmica en el complejo volcánico Las Tres Vírgenes (Antayhua-Vera *et al.*, 2015).

1.3. Área de estudio

1.3.1. Complejo Volcánico Las Tres Vírgenes (CVLV)

El complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLVT), se localiza en el estado de Baja California Sur en el municipio de Mulegé, cerca de las comunidades de Santa Rosalía y San Ignacio a 35 km en dirección SE y 45 km al SW, respectivamente. El CVLTV se extiende sobre un área de $\sim 900 \text{ km}^2$ con una elevación promedio de 720 msnm (Figura 3; Tello-Hinojosa *et al.*, 2005).

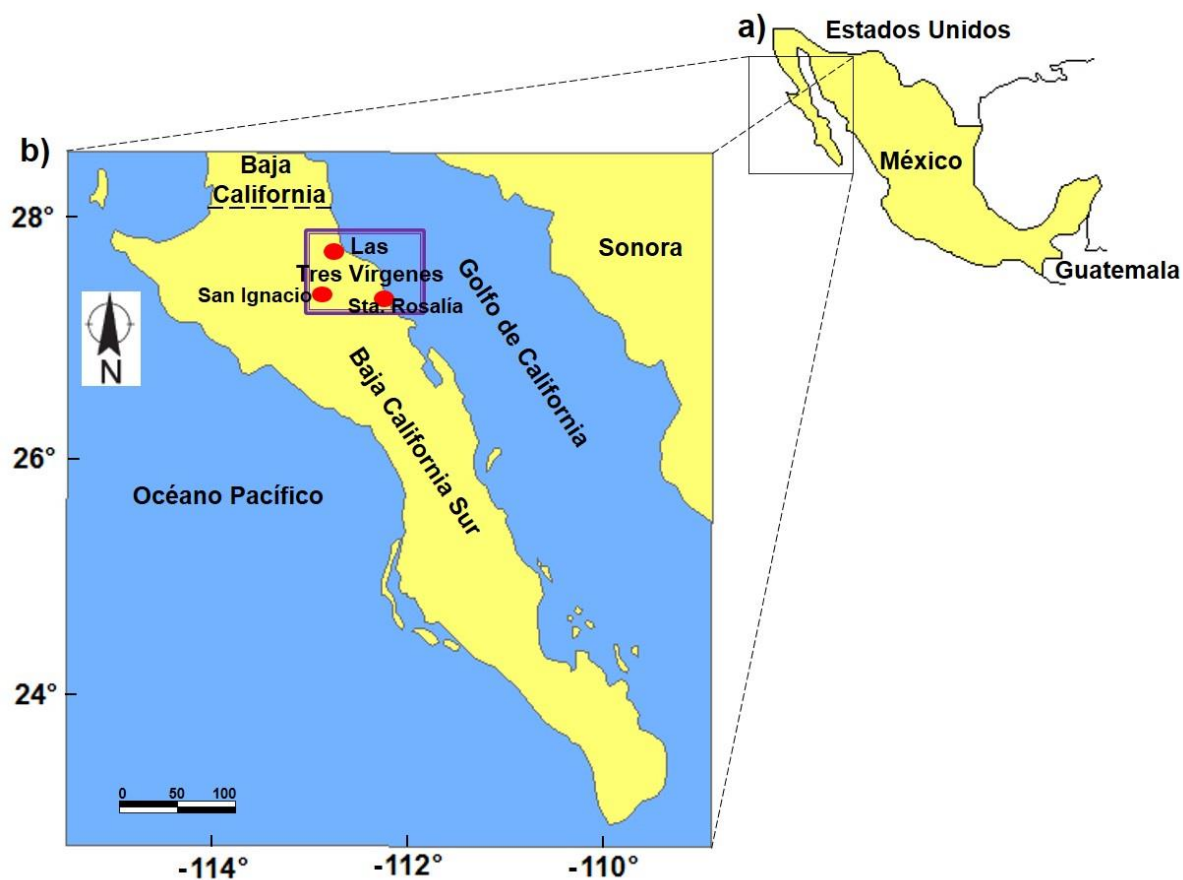


Figura 3. Localización del área de estudio. a) Ubicación del estado de Baja California Sur; b) localización del Complejo Volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV) señalado en el recuadro morado (modificado de Tello-Hinojosa *et al.*, 2005).

1.3.2. Ambiente tectónico y geología regional

Tectónicamente el CVLTV se localiza dentro del dominio transtensional (*pull-apart*) del sistema de fallas laterales derechas que provocaron la separación de la península de Baja California y la formación del actual Golfo de California (Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2012). Este proceso se inició aproximadamente hace 12 Ma (Fletcher *et al.*, 2007), pasando transicionalmente primero de un ambiente de subducción de la placa Farallón (compuesta por las microplacas Guadalupe y Magdalena) hace 16-12 Ma por debajo de la placa de Norteamérica, a una fase de expansión del fondo oceánico (*rift*) (Martín-Barajas, 2000) y creación de fallas transformantes hace 6-5 Ma (Fletcher, *et al.*, 2007; Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2012), proceso que continua hoy día.

El CVLTV está sobre un basamento formado por rocas que van del Cretácico superior (99.1 ± 0.8 Ma) al Plioceno (Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2013) y es el más joven del grupo de la formación comondú¹, que aparece después del cese de la subducción de la placa Farallón e inicio de la expansión del Golfo de California durante el mioceno tardío (Vargas-Ledezma y Garduño-Monroy, 1988; López *et al.*, 1993). La actividad volcánica del CVLTV se cree inició en el pleistoceno empezando por la caldera La Reforma y progresivamente las erupciones más jóvenes fueron alimentadas mediante migración de magma en sentido SE a NW y NW a SW (Schmitt *et al.*, 2006; Schmitt *et al.*, 2010). Parece que la actividad eruptiva de La Virgen (con actividad histórica en 1746; Romo *et al.*, 2000) proviene de una fuente de magma (mucho más joven) diferente o separada de las fuentes de las calderas El Aguajito y La Reforma, de donde estallaron las primeras erupciones (de ignimbritas) en el pleistoceno tardío. La diferencia de edades estimadas de acuerdo a las cantidades de zircones usados ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ y U-Th/He) para datar edades en Tres Vírgenes, implican que el sistema magmático de las calderas es independiente de la cámara magmática de los volcanes (Schmitt *et al.*, 2006; Schmitt *et al.*, 2010). Otro aspecto importante, es el contraste de la geología superficial del CVLTV (Figura 4) que refleja los diferentes ciclos de procesos eruptivos explosivos (productos piroclásticos) y efusivos (lavas) en la zona a través de su historia (Schmitt *et al.*, 2006; Schmitt *et al.*, 2010).

¹Formación geológica que sobreyace en dos unidades diferentes: sedimentos marinos y andesitas-basálticas (Vargas-Ledezma y Garduño-Monroy, 1988). Las edades radiométricas de esta formación le ubican en el rango de 27-11 Ma (López *et al.*, 1993). Desde el punto de vista tectónico, esta unidad se formó como consecuencia de la subducción de la microplaca Guadalupe durante su fase terminal (López *et al.*, 1993).

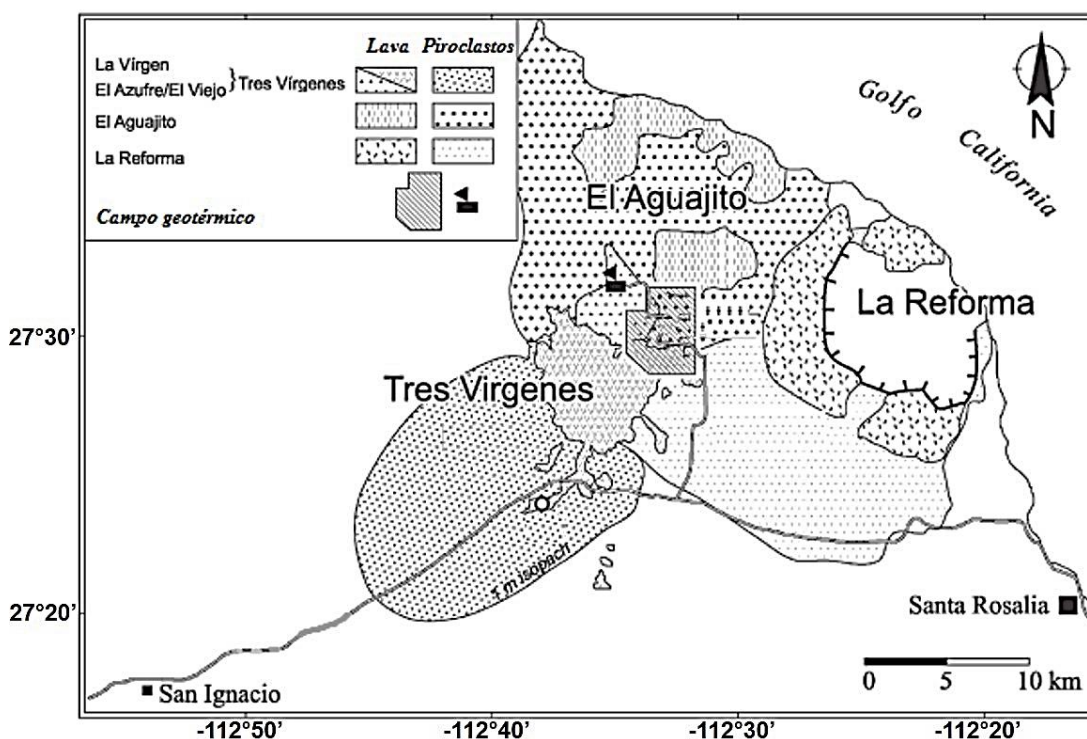


Figura 4. Mapa general de unidades geológicas del complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV). Este mapa muestra el contraste y cobertura de los productos volcánicos debido a erupciones explosivas (piroclastos) y efusivas (lavas) en la zona (modificado de Schmitt *et al.*, 2006).

El complejo volcánico está compuesto por las siguientes estructuras (Figura 5): 1) caldera La Reforma, con una edad de 1.38 ± 0.03 Ma y un radio promedio de 10 km que incluye un domo resurgente de grandes proporciones (Schmitt *et al.*, 2010); 2) la caldera El Aguajito, con una edad de 1.17 ± 0.07 Ma y un radio promedio de 8 km y también incluye un domo resurgente de gran tamaño (Schmitt *et al.*, 2010) y; 3) Las Tres Vírgenes que se compone de tres volcanes activos alineados en dirección NNE-SSW: La Virgen (V.I) con una edad de 0.036 Ma, El Azufre (V.A) con una edad 0.28 Ma, El Viejo (V.V) con una edad de 0.44 Ma (López *et al.*, 1994; Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2012; Macías-Vázquez y Jiménez-Salgado, 2013).

Las fallas principales localizadas en el CVLTV (Figura 5) son: El Cimarrón (F. C), Las Víboras (F. Vib), El Azufre (F.A), El Partido (F.P), El Viejo (F.V), El Volcán (F. Vol), La Virgen (F. Vi) y la posible falla El Álamo (F. Al), ubicada entre la caldera El Aguajito y La Reforma. En las cercanías de la F.A se encuentra el yacimiento geotérmico de Las Tres Vírgenes que tiene un área aproximada de 6 km^2 y se sitúa a más de 1 km de profundidad (Tello-López y Torres-Rodríguez, 2015). Éste campo presenta un conjunto de fumarolas y zonas de alteración hidrotermal en superficie con temperaturas alrededor de los 100°C (Tello-López y Torres-Rodríguez, 2015).

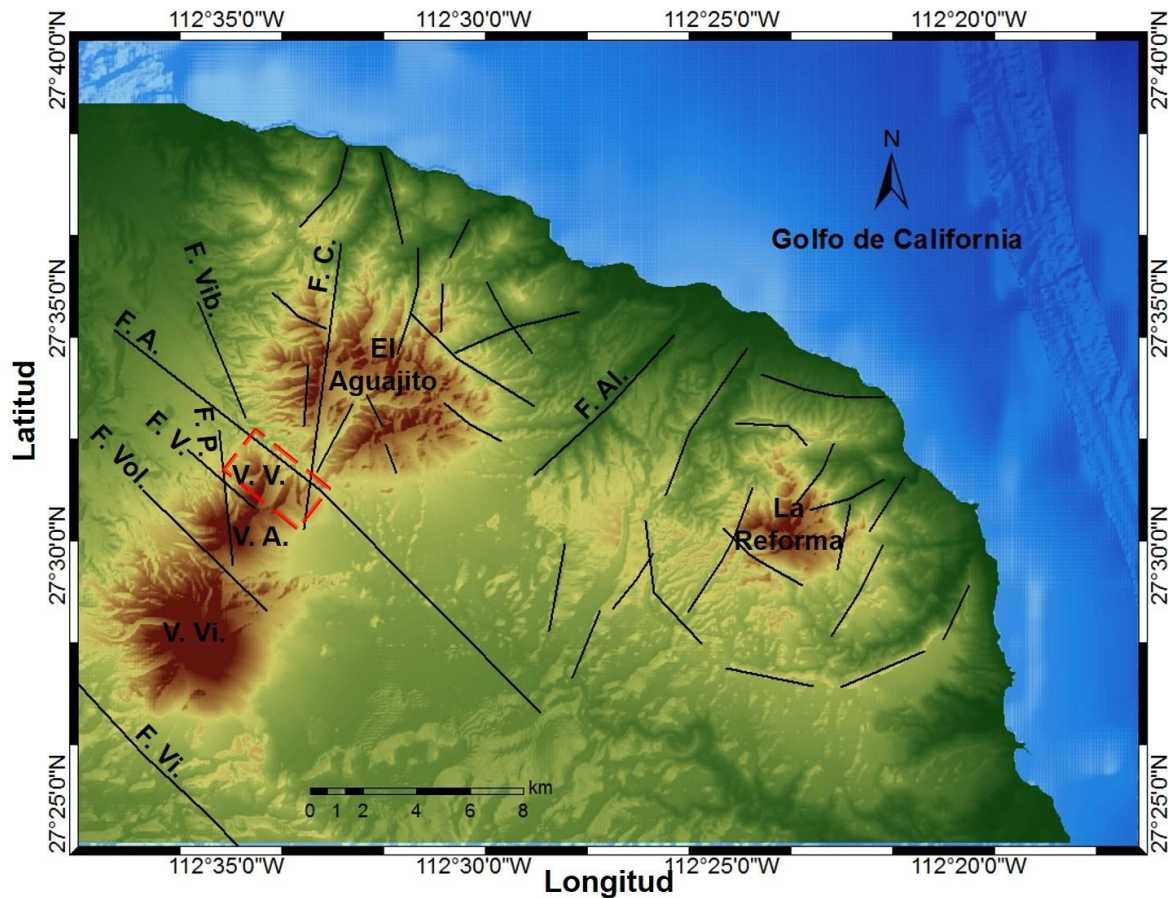


Figura 5. Fallas y estructuras volcánicas principales del complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV). El rectángulo en rojo corresponde al área del campo geotérmico.

1.3.3. Caldera La Reforma

Se considera que la caldera La Reforma se formó desde del Cuaternario (1.38 ± 0.03 Ma; Vargas-Ledezma y Garduño-Monroy, 1988; Garduño-Monroy *et al.*, 1993; Schmitt *et al.*, 2006). Sin embargo, López *et al.*, (1993) reportan edades que indican que la formación de esta caldera comenzó en el Plioceno inferior (5 Ma), por lo que aún esto es tema de discusión. Respecto a la actividad volcánica de la caldera La Reforma, se han identificado tres procesos principales de actividad piroclástica. Los dos más antiguos aparentemente se depositaron en el ambiente marino y el más reciente es subaéreo (López *et al.*, 1993). La expulsión de este material pudo generar diferentes colapsos caldéricos, sin embargo, la formación de la caldera solo es visible en el último ciclo eruptivo que dejó un anillo de colapso que bordea a ésta estructura (Figura 5). El núcleo levantado de la caldera es parte de un fenómeno resurgente asociado a un nuevo aporte de magma y los movimientos isostáticos compensatorios (López *et al.*, 1993). Los flujos piroclásticos y de lavas expulsados cubrieron 10 km a la redonda de La Reforma con un espesor

aproximado de 10 a 50 m, que se encuentran radialmente inclinados desde el centro de la caldera (Vargas-Ledezma y Garduño-Monroy, 1988; Dmochowski, 2005). El volumen inferido de rocas piroclásticas expulsadas fue alrededor de 5 a 10 km³ mientras que el de los basaltos es de 0.5 km³ aproximadamente (Vargas-Ledezma y Garduño-Monroy, 1988; Dmochowski, 2005). De acuerdo a las edades radiométricas se infiere que la actividad volcánica en La Reforma cesó hace 0.8 Ma (López *et al.*, 1993).

A la estructura de La Reforma se le distinguen los siguientes elementos (Vargas-Ledezma y Garduño-Monroy, 1988): depósitos de ignimbritas, un colapso central, domos viscosos localizados cerca de los márgenes de la caldera y dentro de ésta se puede separar dos secuencias, 1) una del plioceno principalmente submarina y 2) una actividad cuaternaria responsable de la morfología actual. Dmochowski (2005), sugiere que las rocas presentes en la superficie de La Reforma son producto del proceso de formación de la caldera y con base a la recopilación de información geológica de trabajos previos en esta zona y el análisis e interpretación de imágenes satelitales MODIS-ASTER (Master), el autor propone un mapa geológico de La Reforma que describe las diferentes unidades de rocas en la caldera como se muestra en la Figura 6.

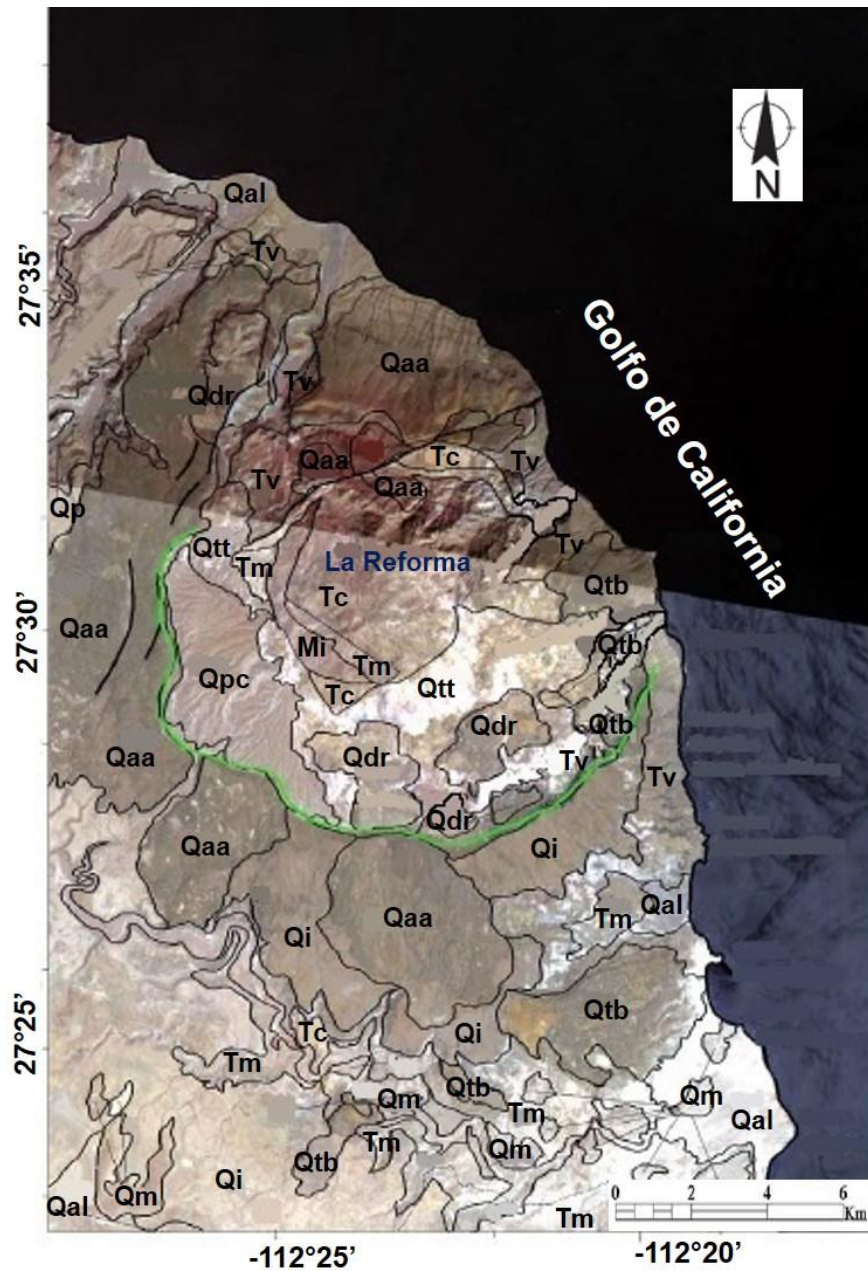


Figura 6. Mapa de unidades geológicas de la caldera La Reforma. Las rocas presentes son: Aluviones recientes (Qal), andesitas-basálticas (Qtb), conglomerado (Qpc), domos de dacitas y riolitas, tobas intracaldera (Qtt), lava andesítica (Qaa), Sedimentos marinos del cuaternario (Qm), Ignimbritas (Qi), sedimentos marinos del cuaternario (Qm), material volcánico del plioceno y pleistoceno (Tv), sedimentos marinos del plioceno (Tm), formación comondú (Tc), y batolitos del cretáceo (Mi). La línea en color verde representa el anillo de colapso de la caldera (modificado de Dmochowski, 2005).

1.4. Justificación

La posibilidad de encontrar nuevos recursos geotérmicos en México para ampliar la producción de los campos actuales, como el caso del campo geotérmico Las Tres Vírgenes, sólo es factible si se continúa con los estudios de exploración que abarquen diversas disciplinas de las Ciencias de la Tierra. Desde esta perspectiva, diferentes autores (Georgsson, 2009; Simiyu, 2009) han recomendado los estudios de microsismicidad ($M < 3$) como una de las herramientas para la exploración de recursos geotérmicos.

Para el caso de un escenario geotérmico con manifestaciones hidrotermales en superficie, se parte de que las fallas y fracturas proveen permeabilidad necesaria para que exista circulación de fluidos geotérmicos, el movimiento de estos pueden generar eventos sísmicos muy pequeños (debido al fracturamiento del medio) que van dejando evidencia de las trayectorias de circulación de dichos fluidos, en este caso se asume que el transporte de calor se lleva a cabo por el mecanismo convectivo de fluidos hidrotermales a profundidades someras (< 2 km) como también de intrusiones magmáticas en la corteza (Munguía y Wong, 1993). También, la microsismicidad puede deberse a la reactivación de fallas preexistentes (Reyes, 1979; Munguía y Wong, 1993).

Por otro lado, en el caso de escenarios geotérmicos que no presentan manifestaciones de actividad hidrotermal en superficie pero sí indicios de actividad magmática a mayores profundidades (5-10 km), la distribución de la sismicidad en profundidad podría permitir localizar la posible zona de Transición Frágil-Dúctil (TFD; con presencia de temperaturas entre 300 y 450°C) de la corteza, a partir de la cual la sismicidad disminuye drásticamente debido a que luego de la TFD el comportamiento del medio es dúctil por su proximidad a una fuente de calor magmática (Scholz, 1988; Dragoni, 1993; Helffrich y Brodholt, 1991; Wong, 2000; Pluijm y Marshak, 2004; DeNosaquo *et al.*, 2009; Kissling *et al.*, 2010; Best, 2013; Suzuki *et al.*, 2014; Violay *et al.*, 2010).

Asimismo, cuando la actividad sísmica dentro y en las vecindades de las estructuras volcánicas puede asociarse al régimen de esfuerzos tectónicos regionales, el estudio de la distribución espacial de la microsismicidad da pautas para entender el control que el tectonismo ejerce sobre los procesos volcánicos o sobre la distribución de zonas de fracturamiento y debilidad que faciliten el flujo de los fluidos hidrotermales. En consecuencia, los estudios de microsismicidad son de importante utilidad para la exploración de zonas geotérmicas con importancia económica.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

De acuerdo con a los antecedentes respecto del CVLTV no se han hecho estudios de sismología en la caldera La Reforma por lo que en este trabajo de investigación se realiza el primer estudio de microsismicidad en esta zona, con el objetivo de verificar y localizar la actividad microsísmica, y establecer si existe una posible relación entre la actividad sísmica registrada con un posible escenario geotérmico.

1.5.2. Objetivos específicos

- Verificar la presencia de microsismicidad en la caldera mediante la instalación de una red sísmica temporal.
- Localizar los eventos sísmicos, determinar sus magnitudes y mecanismo focal.
- Analizar las señales en el dominio del tiempo y la frecuencia de los eventos registrados, para comprender su génesis.
- Proponer un modelo térmico unidimensional bajo la caldera e inferir la localización de la posible zona de Transición Frágil-Dúctil (TFD) en profundidad.
- Establecer si existe una posible relación entre la actividad sísmica en profundidad con la zona de TFD bajo la caldera.

Capítulo 2. Metodología

El presente capítulo describe la metodología para la adquisición y procesamiento de datos sísmicos en la caldera La Reforma del CVLTV, así como el procedimiento de modelación térmica para la zona de estudio.

2.1. Sismología

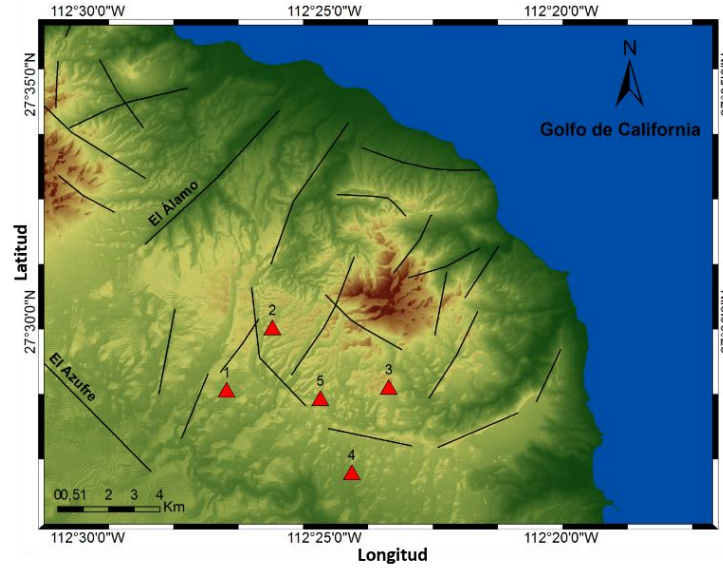
2.1.1. Red sísmica

El registro de la actividad sísmica en volcanes y calderas se realiza a partir de la instalación de redes sísmicas permanentes o temporales conformadas por sensores sísmicos que se ubican alrededor de dichas estructuras. La instalación instrumental debe tener en cuenta de manera previa aspectos básicos como, el número de equipos y distancia entre ellos, apertura con la que se va a configurar la red, accesibilidad al sitio de instalación, resolución o rango de señales que se desea registrar, gap instrumental, etc. (Frez *et al.*, 2000; Nava *et al.*, 2009; Wassermann, 2012).

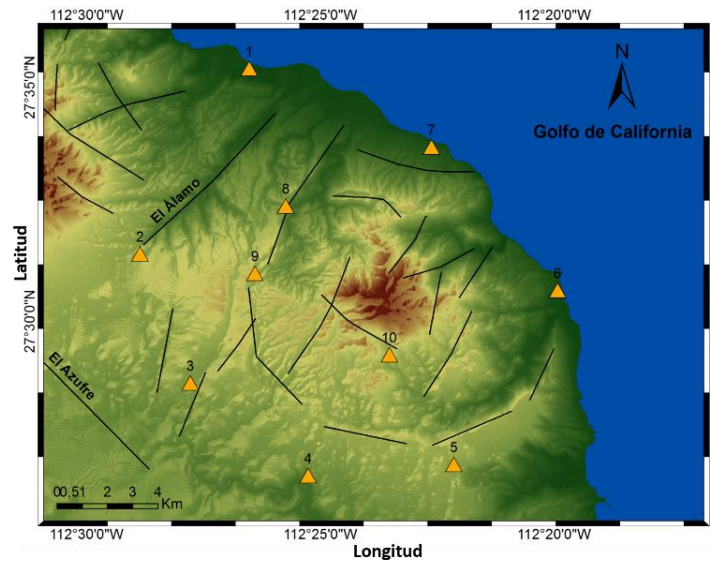
En el presente estudio se realizaron dos campañas para instrumentar temporalmente la caldera La Reforma del CVLTV. La primera realizada entre el mes de septiembre y octubre de 2015 tuvo como fin verificar la presencia de microsismicidad en la caldera. En esta campaña se instalaron 5 estaciones sísmicas (Tabla 2, Figura 7) con un espaciamiento de 3 km en promedio, logrando cubrir sólo el ~30% del área de la caldera. La segunda campaña fue realizada en los meses de abril y mayo de 2016, instalándose 10 estaciones sísmicas (Tabla 3, Figura 8) con un espaciamiento de 6 km en promedio entre ellas, logrando cubrir la caldera y permitiendo un mayor registro de sismicidad en la zona. La Figura 9 muestra la distribución de estaciones de las dos campañas.

Tabla 2. Coordenadas de las estaciones de la primera campaña.

No.	Lat (N)	Long (W)	Elev. (m)
1	27°28.54'	112°27.07'	489
2	27°26.81'	112°24.43'	456
3	27°29.89'	112°26.11'	571
4	27°28.38'	112°25.06'	555
5	27°28.64'	112°23.66'	686

**Figura 7.** Red sísmica temporal de la primera campaña. Los triángulos rojos corresponden a las estaciones sísmicas, las líneas negras a fallas y fracturas.**Tabla 3.** Coordenadas de las estaciones de la segunda campaña.

No.	Lat (N)	Long (W)	Elev. (m)
1	27°35.422'	112°26.514'	8
2	27°31.445'	112°28.851'	504
3	27°28.703'	112°27.757'	472
4	27°26.693'	112°25.260'	283
5	27°26.962'	112°22.110'	533
6	27°30.665'	112°19.920'	43
7	27°33.726'	112°22.633'	49
8	27°32.455'	112°25.756'	394
9	27°31.007'	112°26.408'	582
10	27°29.275'	112°23.491'	512

**Figura 8.** Red sísmica temporal de la segunda campaña. Los triángulos naranjas corresponden a las estaciones sísmicas, las líneas negras a fallas y fracturas.

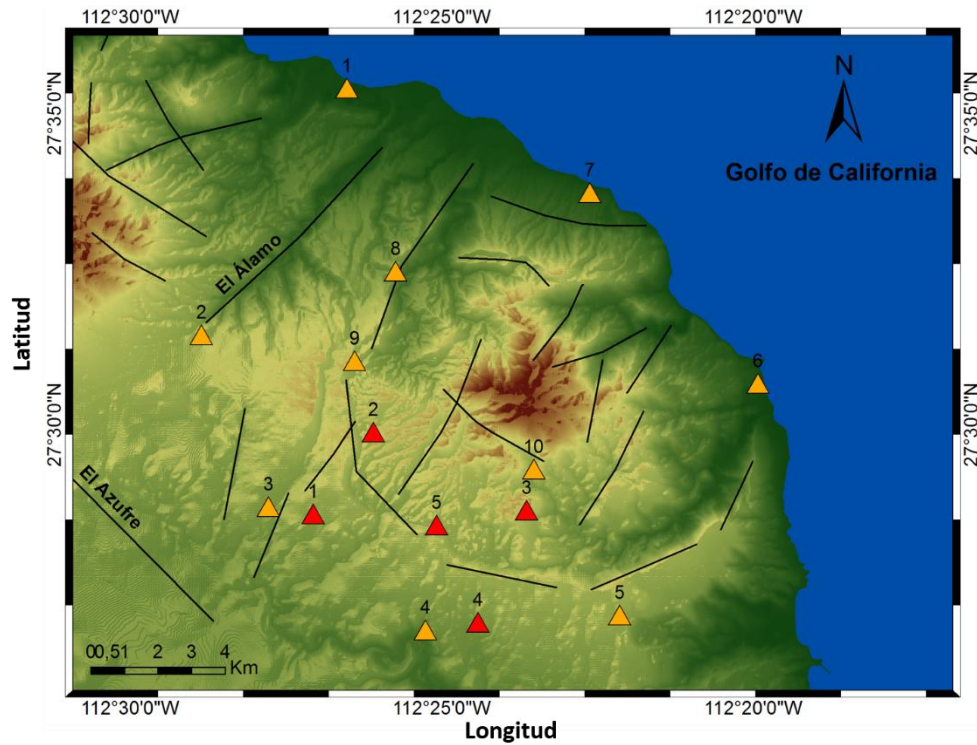


Figura 9. Ubicaciones de estaciones sísmicas de la primera campaña (triángulos rojos) y segunda campaña (triángulos naranjas).

2.1.2. Equipos

Las estaciones instaladas en la cadera La Reforma, estuvieron conformadas por sismógrafos de periodo corto SARA (SS20) de tres componentes (vertical, norte-sur y este-oeste), digitalizadora de 24 bits (SL06; configurada a una tasa de registro de 100 mps), dos baterías y una antena GPS para fijar el tiempo de los registros (Figura 10). En la Tabla 4 se muestran las especificaciones generales del equipo.

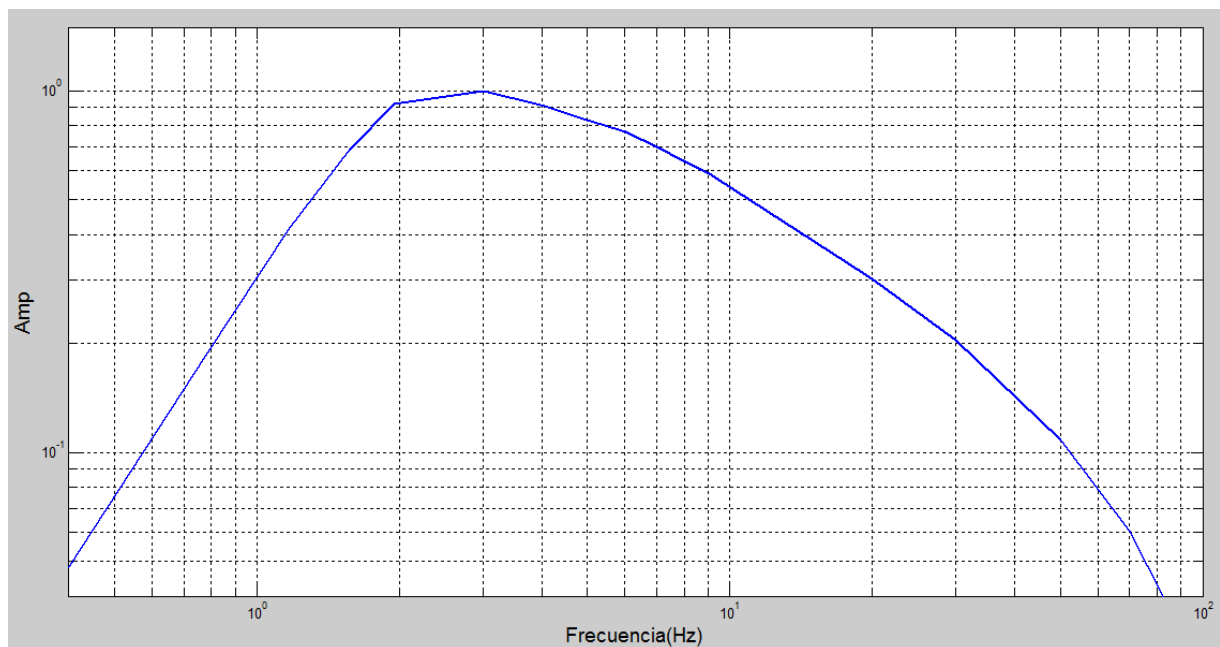


Figura 10. Instrumentación usada. Sensor (a), digitalizador (b) y antena GPS (c).

Tabla 4. Especificaciones generales del equipo

Frecuencia Natural	2.0Hz (+/- 15%)
Rango operacional vertical	7°
Rango operacional horizontal	+/-0.5°
Resistencia DC	1250 ohm (+/-5%)
Capacitores	2.2, 1 y 0.47 μ F (de acuerdo al muestreo)
Resolución de la tarjeta digitalizadora	24 bits
Damping	0.64
Sensibilidad del motor	40 v/m/s (+/-10%)
Tasas de muestreo	10, 20, 25, 50, 100, 200 m.p.s
Filtro antialias	1 polo de 8.8Hz (este filtro depende del muestreo)
Fuente de alimentación	10-15V (en promedio 12V) y 400mA DC
Rango dinámico	144dB
Potencia pico del digitalizador	2V pico a pico (+/-1V)
Temperatura de operación	-20 +/- 70 °C

El filtro antialias para este estudio está configurado con un capacitor de 0.47 μ F para una mínima frecuencia de muestreo de 100 mps. La respuesta del instrumento teniendo en cuenta este filtro (del sensor) y el del digitalizador, se muestra en la Figura 11.

**Figura 11.** Respuesta de amplitud del SARA para una mínima frecuencia de muestreo de 100 mps.

2.1.3. Bases de datos

Para ambas campañas los datos fueron registrados de manera continua en segmentos de una hora. En la primera campaña la base de datos contó con 530 formas de onda durante 20 días entre el mes de septiembre y octubre de 2015. En cuanto a la segunda campaña, la base de datos tiene alrededor de 800 formas de onda durante 30 días entre el mes de abril y mayo de 2016.

2.1.4. Procesamiento

2.1.4.1. Localización de eventos

Las formas de onda quedan organizadas de acuerdo a la estructura que dispone el software de análisis sísmológico SEISAN (Haskov y Ottemöller, 1999; Ottemöller *et al.*, 2015) para almacenarlas y procesarlas posteriormente. Los datos adquiridos son procesados con el programa Hypocenter (Lienert y Havskov, 1995) que está incluido en SEISAN el cual utiliza datos de entrada como: nombre de la estación, sus coordenadas geográficas (latitud y longitud), elevación, lectura de los tiempos de arribo de las ondas de cuerpo (T_p y T_s), la Coda o duración total del sismo, una relación de velocidad de las ondas de cuerpo (V_p/V_s), un modelo de velocidades y una ecuación para el cálculo de la magnitud de duración (M_c). En el caso del modelo de velocidades, su importancia radica en que este contribuye en gran medida al control de las localizaciones de los eventos, para el presente estudio se usó el modelo propuesto por Macías-Carrasco (1997) para la zona de Las Tres Vírgenes. Macías-Carrasco (1997) discute sobre los modelos de velocidad elaborados para esta zona en la década de los 90's y recomienda para localización focal de eventos el modelo reportado en la Tabla 5.

Tabla 5. Modelo de velocidad de corteza para Las Tres Vírgenes (Macías-Carrasco 1997).

Vp (km/s)	Prof. (km)
1.2	0.0
3.3	0.2
4.7	1.0
5.7	3.9
6.3	7.0
7.5	11.0
8.2	25.00

La relación de las velocidades V_p/V_s utilizada para la localización de los eventos, fue de 1.68 estimada por Wong (2000) para la zona de Las Tres Vírgenes. Para el cálculo de la magnitud se usó la relación propuesta por Munguía y Wong (1993) para esta misma zona:

$$M_c = 1.81 * \log_{10}(T) + 0.0033 * D - 0.45 \quad (1)$$

donde, T es la duración total del sismo (en segundos) y D es la distancia epicentral (en kilómetros).

De los registros observados sólo se consideraron los eventos donde la diferencia de tiempo de la lectura de S respecto a P (S-P) sea menor a 3 segundos (para eventos locales) y de esta manera también se descartan los eventos lejanos. En los sismogramas se identificaron los arribos de las ondas P, S y Coda, para cada una de las estaciones sísmicas con el fin determinar los parámetros básicos de los eventos (latitud, longitud, profundidad y magnitud). En la Figura 12 se muestra las lecturas de P, S y Coda (líneas rojas) tomando como ejemplo el sismograma del evento del 16 de septiembre de 2015 a las 2:50 hrs-UTC, registrado por 4 estaciones.

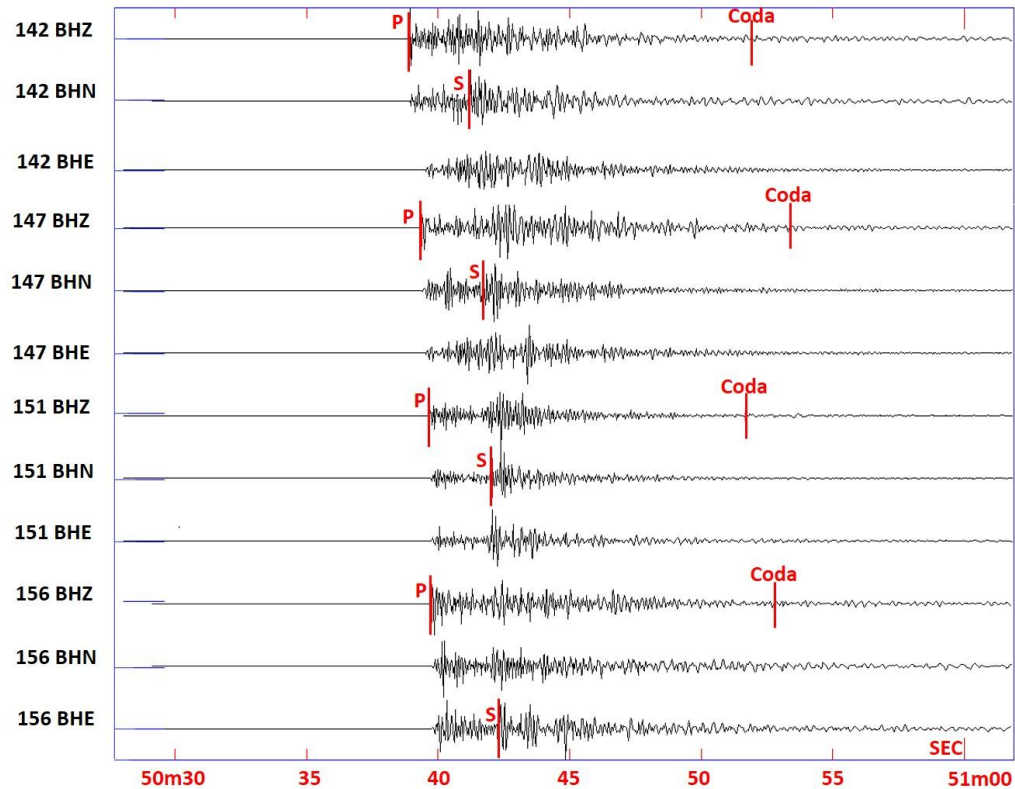


Figura 12. Ejemplo sismograma y lectura de P, S y Coda del evento registrando por 4 estaciones en septiembre 16 de 2015 a las 02:50 UTC. La orientación de la componente vertical, norte-sur y este-oeste es indicada por BHZ, BHN y BHE, respectivamente.

2.1.4.2. Mecanismos Focales

El mecanismo focal o la solución del plano de falla describe la orientación y deslizamiento de una ruptura en la corteza para un evento sísmico específico (Havskov y Ottemöller, 2010). La determinación del mecanismo focal proporciona importante información para interpretar los procesos físicos que han tenido lugar en la región del foco de un sismo, permitiendo conocer el correspondiente estado o régimen de deformación que lo produce (Cronin, 2010; Havskov y Ottemöller, 2010; Bormann y Wendt, 2012). En la mayoría de los casos las fallas no dejan evidencia de su ruptura en la superficie lo que complica caracterizarlas mediante métodos geológicos, por lo que la determinación del mecanismo focal resulta de gran utilidad ya que proporciona información de las rupturas a cualquier profundidad (Havskov y Ottemöller, 2010).

La manera convencional para el cálculo del mecanismo focal de un evento sísmico es a partir de los tiempos de arribo de las formas de ondas registrados en un conjunto de estaciones geográficamente separadas del evento. De acuerdo a las localizaciones conocidas de dichas estaciones se calcula la distancia entre cada estación y el epicentro, luego con el modelo de velocidad usado para la zona de estudio se define el momento exacto en que la onda P del sismo llega a cada estación, posteriormente se observa el sismograma en cada estación (en la componente vertical) para evaluar si el primer movimiento detectado de la onda P es hacia “arriba” o hacia “abajo” (Figura 13). La parte de la energía sísmica recibida por cada estación en forma de onda P ya sea compresiva (movimiento hacia arriba) o de dilatación (movimiento hacia abajo), viaja a lo largo de una trayectoria desde el foco hasta la estación, por lo que se debe tener en cuenta dos aspectos: 1) el rumbo o acimut, que indica la dirección de donde proviene el rayo sísmico desde el foco a la estación y, 2) el ángulo de salida desde la fuente de este rayo. Estos parámetros son proyectados sobre una esfera centrada en el epicentro del sismo, la cual se divide en 4 cuadrantes donde se distribuyen las dilataciones y compresiones para poder determinar el tipo de mecanismo focal (Figura 14; más detalles en Havskov y Ottemöller, 2010), y una vez obtenido éste, la solución del plano de falla (principal y auxiliar) puede ser descrito en términos de tres ángulos que lo orientan: rumbo (ϕ), buzamiento (δ) y dirección de deslizamiento (λ) (Figura 15; Havskov y Ottemöller, 2010). La importancia de la solución del plano de falla, es porque contribuye al conocimiento e interpretación de la tectónica local o regional, independientemente del tipo de ambiente estructural que se estudie (Bufo y Pro, 2006; Cronin, 2010; Guzmán-Speziale, 2001; Munguía *et al.*, 2006).

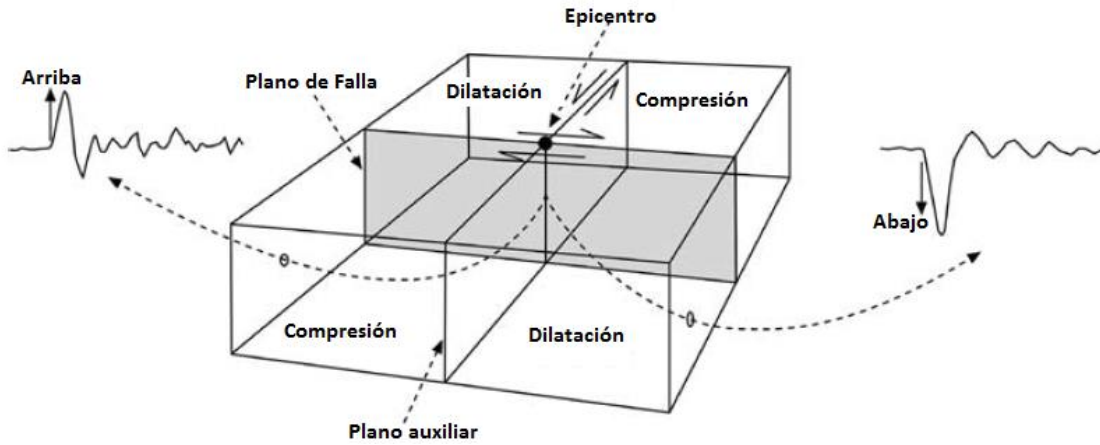


Figura 13. Primer arribo de P observado en diferentes direcciones relativas para una falla de deslizamiento (*strike-slip*). Las dos flechas en el plano de falla muestran la dirección de su deslizamiento relativo y las otras dos flechas en el plano auxiliar muestran el movimiento que daría el mismo sismograma. Las flechas también pueden considerarse como las fuerzas que generan el movimiento (modificado de Havskov y Ottemöller, 2010).

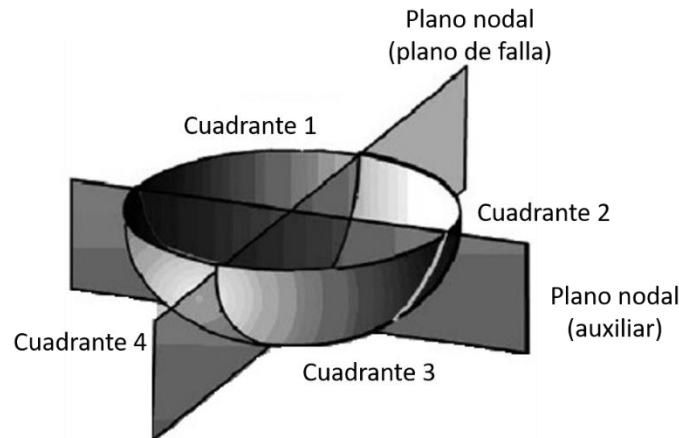


Figura 14. Esfera focal en el hemisferio inferior dividida en 4 partes (modificado de Havskov y Ottemöller, 2010).

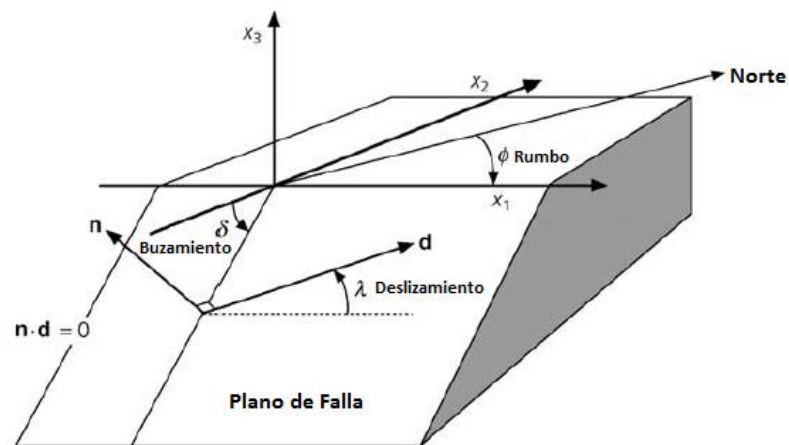


Figura 15. Geometría de falla. La orientación de una falla es definida por el ángulo de rumbo ($0 \leq \varphi \leq 360^\circ$) y buzamiento ($0 \leq \delta \leq 90^\circ$). La dirección de deslizamiento del plano de falla es definida por el ángulo λ (-180 a 180°) que se mide en sentido contrario a las manecillas del reloj (modificado de Havskov y Ottemöller, 2010).

La manera como se nombran las fallas depende de la orientación que tienen con respecto a la superficie del terreno. La Figura 16 muestra algunos ejemplos de las posibles combinaciones de ruptura de la corteza.

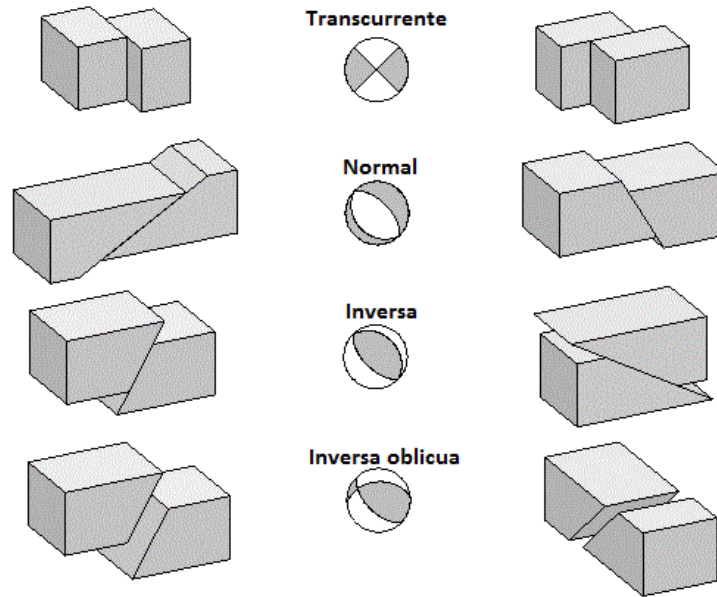


Figura 16. Ejemplos de diferentes orientaciones de fallas respecto a la superficie del terreno con sus correspondientes nombres (modificado de USGS, 2016).

Para la determinación del mecanismo focal de los eventos de la caldera La Reforma se siguió el procedimiento descrito anteriormente usando la herramienta FPFIT (Reasenberg y Öppenheimer, 1985) que también está incluido en SEISAN. Se tuvo en cuenta aquellos sismos con precisiones de localización menores a ± 2 km y un mínimo de 6 lecturas de P (que es lo permitido por FPFIT) cuyo arribo este bien definido en la componente vertical.

2.1.4.3. Análisis de señales

Una de las maneras para estudiar la sismicidad de una región, es correlacionar las señales sísmicas con sus posibles procesos físicos que las generan (fuentes). Para esto, se puede analizar los registros sísmicos en el dominio del tiempo y de la frecuencia e identificar ciertos patrones como la envolvente de la forma de onda, el espectro Fourier, rango de frecuencias, etc. (Ibáñez y Carmona, 2000).

En el estudio de una región volcánica, las señales sísmicas que se registran pueden ser diferentes a las que se esperan de un ambiente puramente tectónico, ya que en las regiones volcánicas ocurren una serie de eventos sísmicos cuyo origen está relacionado con la dinámica de fluidos (magma o gas) como también con la tectónica local debido a la variación del estado de esfuerzos *in situ* (Ibáñez y Carmona,

2000). A continuación se hace una descripción general de los tipos de señales sísmicas que pueden esperarse frecuentemente en estructuras volcánicas con base a lo documentado por autores como Ibáñez y Carmona (2000), Wassermann (2012), Zobin (2012) e Inza-Callupe (2014).

Eventos Volcano-Tectónicos (VT): se presentan en un amplio rango de profundidades, desde varios kilómetros hasta la misma superficie de la estructura volcánica. Comúnmente estos eventos están relacionados con el fracturamiento del medio debido a la variación del estado de esfuerzos a causa del transporte de fluidos o debido a la tectónica local (Ibáñez y Carmona, 2000). La duración de la señal de estos eventos es variable, desde pocos segundos para eventos pequeños hasta algunos minutos para los más grandes. El comienzo de la señal suele ser más o menos impulsivo (llegada de la onda P) y es posible identificar la llegada de la onda S, luego hay una contribución de ondas superficiales y un decaimiento final en forma exponencial (Coda) (Figura 17; Wassermann, 2012). El contenido espectral de interés, es decir, donde están las mayores amplitudes de este tipo de registro, se encuentra en el rango de frecuencias entre 1 y 8 Hz, en ocasiones un poco más allá de los 8 Hz (Wassermann, 2012; Zobin, 2012; Inza-Callupe, 2014).

Eventos híbridos (H): Este tipo de evento tiene un comienzo caracterizado por señales altas frecuencias y normalmente sus mayores amplitudes están entre 3 y 8 Hz (o un poco más allá de los 8 Hz; Ibáñez y Carmona, 2000; Wassermann, 2012; Zobin, 2012; Inza-Callupe, 2014). En el registro puede identificarse las fases P y S, por lo que normalmente se asocia con un pequeño terremoto (Figura 17). Este tipo de eventos puede considerarse como una combinación de características de eventos LP y VT (multifase), lo que puede reflejar una posible mezcla de mecanismos de fuente de ambos eventos y/o reflejar los posibles efectos de trayectoria (Wassermann, 2012).

Eventos de Largo Periodo (LP): Están caracterizados por tener una duración entre los pocos segundos hasta un poco más de un minuto y su rango de frecuencia de mayores amplitudes esta entre 0.2 y 10 Hz (Wassermann, 2012). Su comienzo suele ser emergente, por lo que resulta muy difícil determinar el momento exacto del comienzo de la señal. No presenta llegadas definidas de ningún tipo de fase y su forma de onda es similar a un “tornillo” (Figura 17; Ibáñez y Carmona; Zobin, 2012). Se ha podido observar que existe una fuerte relación entre la ocurrencia de enjambres de eventos tipo LP y la presencia muy cercana de erupciones volcánicas (Ibáñez y Carmona, 2000; Wassermann, 2012; Zobin, 2012; Inza-Callupe, 2014).

Eventos Tremor (TR): se caracteriza por mantener una amplitud constante durante un largo periodo de tiempo (Figura 17) que puede oscilar entre varios minutos y horas (Ibáñez y Carmona, 2000). Las mayores amplitudes están en el rango de frecuencias de 1 a 5 Hz (Wassermann, 2012). Este tipo de evento se relaciona directamente con la actividad de degasificación en periodos previos a erupciones o en el mismo momento de estas (Wassermann, 2012; Zobin, 2012).

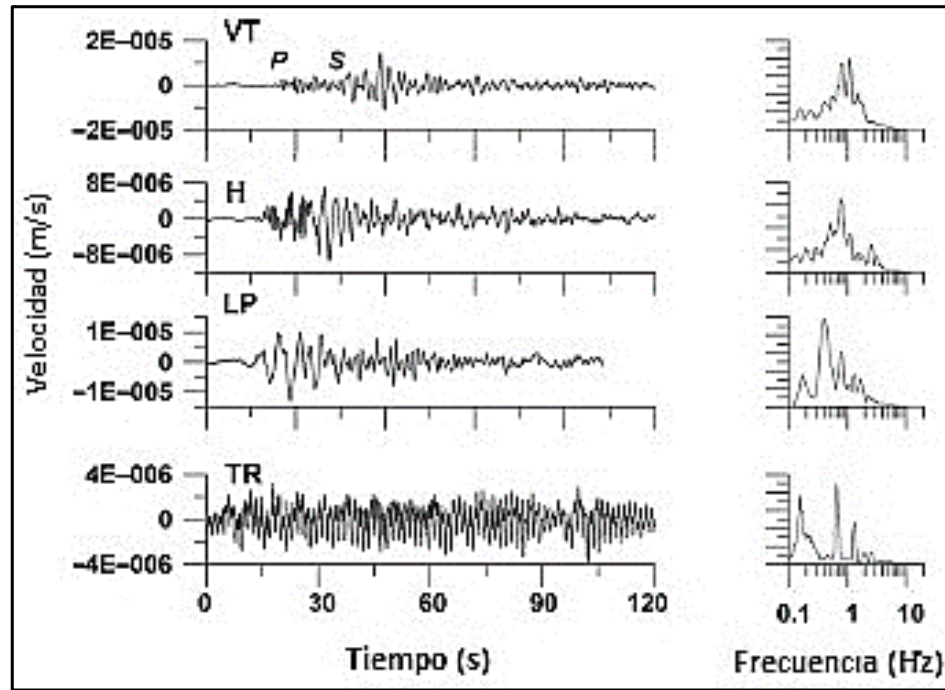


Figura 17. Tipos de señales sísmicas en estructuras volcánicas, formas de onda a la izquierda (componente vertical de un sismógrafo) y sus respectivos espectros de Fourier a la derecha. Evento volcano-tectónico (VT); híbrido o multifase (MP); largo periodo (LP); Tremor (TR) (Modificado de Zobin, 2012).

De acuerdo a lo anterior, para el análisis de las señales de los 38 eventos registrados se usó el sismograma de la componente vertical de una estación tomada como referencia para cada campaña (estación número 5 para la primera campaña y estación número 10 para la segunda campaña que son las que se encuentran en el centro de cada red; ver Figura 9) y se observaron en el dominio del tiempo y de la frecuencia (espectro de Fourier). Estas señales fueron corregidas por la respuesta del instrumento (ver Figura 11), mediante un cociente entre el espectro de cada registro y la respuesta instrumental para obtener la señal pura, con lo cual se pueden observar los cambios que se presentan al remover el efecto instrumental. Esto permite un mejor análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia de los registros respecto a identificar el posible tipo de evento al que se asocian. Las herramientas usadas para el análisis de las señales en el dominio del tiempo y la frecuencia fueron el software MatLab y Geopsy.

2.2. Modelado Térmico

2.2.1. Hipótesis

Se realizó un modelado térmico 1D bajo la caldera la Reforma para establecer si existe una posible relación entre las condiciones de temperatura litológica de dicha estructura con la ocurrencia de sismicidad en profundidad, considerando que el modelo reológico de la corteza se divide en dos capas (Figura 18a; Scholz, 1988; Dragoni, 1993), la primera con una zona superior “frágil” donde las rocas tienden a fracturarse con más facilidad; y la segunda, considerada como una zona “dúctil” donde las rocas son menos probables a fracturarse (Scholz, 1988; Dragoni, 1993). Entre estas dos capas de la corteza se encuentra la zona de Transición Frágil-Dúctil (TDF), a partir de esta zona la sismicidad tiende a reducirse con respecto a la profundidad (Pluijm y Marshak, 2004). En la Figura 18a se muestra un esquema en el que se puede observar como la resistencia-frágil de las rocas en la parte superior de la corteza aumenta con la profundidad y presión de confinamiento; luego en la parte inferior la resistencia-dúctil de las rocas disminuye al aumentar la temperatura. La zona de TFD se produce donde la resistencia-frágil es igual a la resistencia-dúctil (máximo esfuerzo diferencial; Scholz, 1988). En general la sismicidad ocurre entre temperaturas de la parte muy somera de la corteza hasta $\sim 300^{\circ}\text{C}$ que es donde comienza la zona de TFD y empieza el final de los procesos cataclásticos, luego hay un rango de temperaturas entre 300 y 450°C de la TFD en donde termina finalmente el proceso cataclástico y las rocas de la corteza tienden a tener un comportamiento “dúctil” como se muestra en la Figura 18b (Scholz, 1988; Dragoni, 1993).

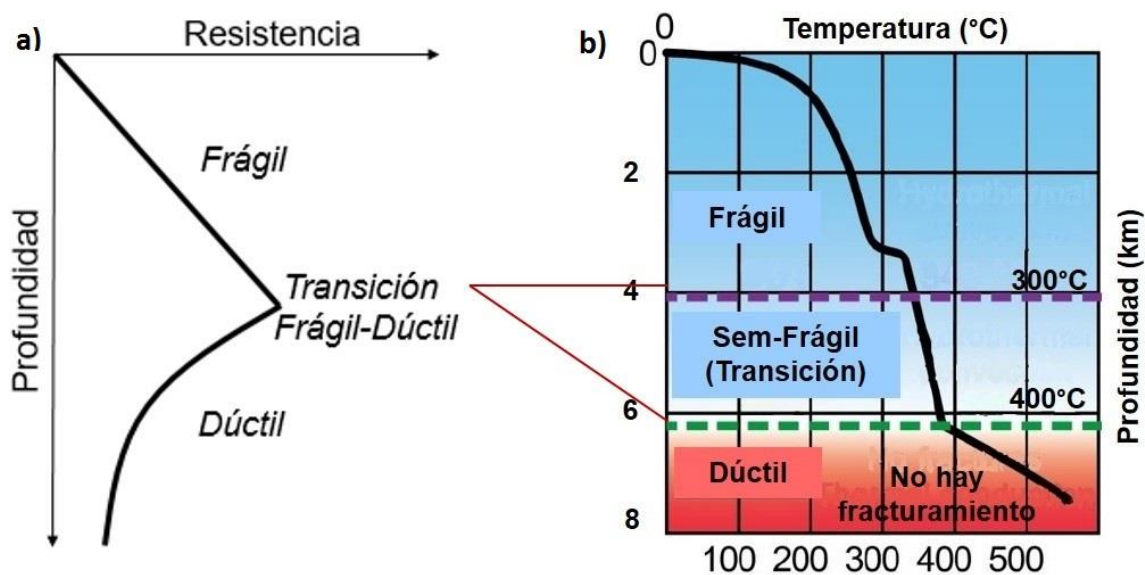


Figura 18. Esquema del modelo reológico de la corteza (izquierda) relacionado con un perfil geotérmico de una estructura volcánica (derecha) (modificado de Scholz, 1988 y Suzuki *et al.*, 2014).

Para complejos volcánicos con calderas y/o volcanes activos la zona de TFD puede ubicarse en un rango de 5 km a 10 km de profundidad (Figura 18b; DeNosaquo *et al.*, 2009; Kissling *et al.*, 2010; Suzuki *et al.*, 2014). Desde el punto de vista de exploración geotérmica, autores como Suzuki *et al.* (2014) comentan que la TFD es críticamente importante por tres razones: 1) para extraer isothermas en calderas y volcanes del cuaternario ($\sim 380^{\circ}\text{C}$) que se asocian con un alto nivel de intrusión magmática; 2) es una zona de máxima resistencia a partir de la cual hay generación importante de fracturas dado la preferente concentración de esfuerzos; y 3) sirve como interpretación del límite de ocurrencia de fracturamiento en la corteza, sismicidad y convección hidrotermal (en caso de existir actividad de fluidos hidrotermales).

Con base a lo anterior, se considera que la distribución de las profundidades focales de los eventos registrados, podrían relacionarse con un posible rango de temperaturas entre 300 y 450°C bajo la caldera La Reforma, donde es posible que las profundidades de las isothermas en este rango tengan relación con la profundidad a partir de la cual disminuye la ocurrencia de eventos. Para contribuir en la evaluación de esta hipótesis desde el punto de vista geotérmico, se describe a continuación algunos conceptos y la metodología empleada para el estudio térmico propuesto en este trabajo.

2.2.2. Ecuación de transferencia de calor

El calor es la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura y esta fundamentalmente integrada por la energía cinética a nivel molecular y atómico de la materia. Para efectos prácticos en la naturaleza, llamamos a la energía térmica calor y a la transferencia de energía térmica como *transferencia de calor* (Cenegel, 2007), conceptos fundamentales para el estudio del comportamiento térmico de la Tierra y de gran ayuda en los métodos térmicos (estimación de gradientes, flujos de calor, temperaturas estabilizadas de formación, etc.) utilizados en exploración geotérmica.

En el interior de la Tierra, la transferencia del calor contribuye en los procesos de formación magmática, ya que las rocas en estado sólido al ser sometidas al continuo calentamiento en profundidad llegan a fundirse, permitiendo la formación de magma que es la fuente de calor primaria de la mayoría de los sistemas geotérmicos hidrotermales (conocidos también como sistemas convencionales). De acuerdo con la Tectónica de Placas, dentro de la litosfera el calor es transferido a la superficie principalmente por conducción y la temperatura crece progresivamente con la profundidad, con un gradiente geotérmico promedio de $33^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Figura 19; Francis, 1993). En la astenosfera, a profundidades entre 100 y 120 km se alcanzan temperaturas de $1,350^{\circ}\text{C}$ (las rocas se funden) y el proceso de transferencia de calor es

dominado por la convección donde hay una zona de baja velocidad para las ondas sísmicas (Figura 19; Francis 1993).

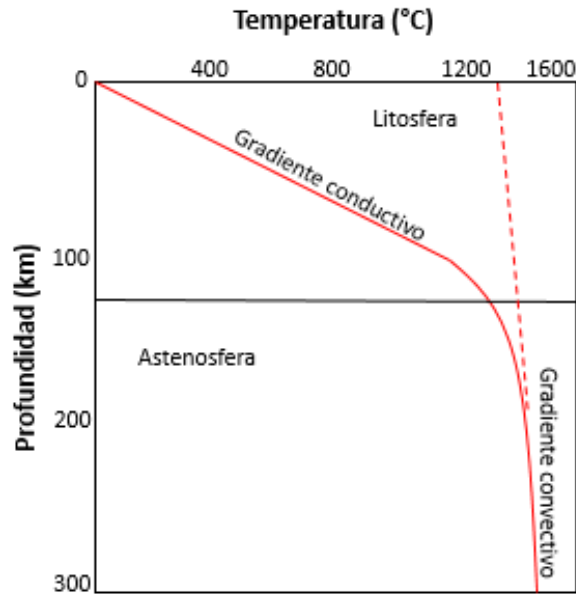


Figura 19. Esquema general de comportamiento térmico de la Tierra. La línea roja continua describe el cambio del mecanismo de transferencia de calor entre manto y corteza, mientras que la línea sesgada corresponde a los 1,350°C que es el punto de fusión de las rocas en una zona ya dúctil y de baja velocidad de las ondas sísmicas (modificado de Francis, 1993).

Para estimar o inferir las posibles temperaturas que se encuentran a diferentes profundidades en una zona de interés geotérmica, la modelación térmica es una herramienta fundamental. Para el presente estudio se utilizó la ecuación de transferencia de calor por conducción en estado transitorio en 1D (p. ej. Ec. 2; Versteeg y Malalasekera, 1995; Cenegel, 2007).

$$(\rho c_p) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S \quad (2)$$

donde,

ρ es la densidad de las rocas (g/cm^3).

C_p es la capacidad calorífica de las rocas ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$).

κ es la conductividad térmica de las rocas de la litología de la zona de estudio ($\text{W/m}^\circ\text{C}$).

S es la fuente de calor o sumidero.

Esta ecuación se discretizó utilizando el método de volúmenes finitos (MVF) o volúmenes de control (Versteeg y Malalasekera, 1995), para ello, inicialmente un dominio (x, y o z) se divide en una malla regular de volúmenes de control como se muestra en la Figura 20.

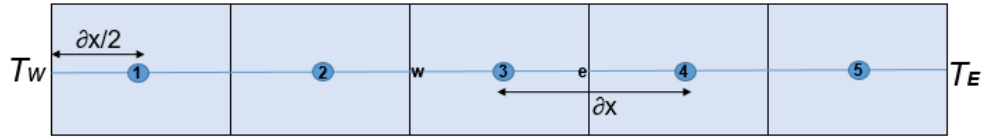


Figura 20. Esquema general del método de discretización mediante volúmenes de control. Se muestran una malla de 5 volúmenes finitos o de control (de izquierda a derecha) cuyos puntos en azul corresponden a los nodos P que son el centro de cada volumen de control en donde se estima la temperatura T a una distancia Δx entre ellos; a la izquierda de estos está la temperatura de la frontera oeste T_w y a la derecha la temperatura de frontera este T_e (modificado de Versteeg y Malalasekera, 1995).

Luego la ecuación de transferencia de calor se resuelve en cada volumen de control para encontrar el perfil térmico en todo el dominio (en este caso respecto a la profundidad), utilizando un esquema implícito donde la ecuación discretizada en cada volumen de control corresponde a la siguiente expresión (Versteeg y Malalasekera, 1995):

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + S \quad (3)$$

Donde a_P es $\rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t}$, a_E y a_W son $\frac{k}{\Delta x} A$ en los nodos este y oeste respectivamente.

A partir de la ecuación 3, el sistema de ecuaciones discretizadas en todos los volúmenes de control se expresan de la siguiente manera:

Nodo 1 (primer volumen)

$$\gamma + 3 \frac{kA}{\Delta x} T_P = \frac{kA}{\Delta x} T_e + 2 \frac{kA}{\Delta x} T_w + S + \gamma T_P^0 \quad (4)$$

Nodos centrales (volúmenes 2, 3 y 4)

$$\gamma + 2 \frac{kA}{\Delta x} T_P = \frac{kA}{\Delta x} T_e + \frac{kA}{\Delta x} T_w + S + \gamma T_P^0 \quad (5)$$

Nodo N (volumen 5)

$$\gamma + 3 \frac{kA}{\Delta x} T_P = \frac{kA}{\Delta x} T_w + 2 \frac{kA}{\Delta x} T_e + S + \gamma T_P^0 \quad (6)$$

Donde, $\gamma = \frac{\rho C_p}{\Delta t}$ es la parte transitoria o temporal de las ecuaciones (4-6), T_p corresponde a la temperatura calculada en el nodo central P de cada volumen de control y T_p^0 es la temperatura calculada en un tiempo $t-1$ (para el caso del primer paso de tiempo corresponde a la temperatura inicial).

Finalmente el sistema de ecuaciones resultantes se resuelve mediante el Algoritmo de la Matriz Tri-Diagonal (TDMA, por sus siglas en inglés; Versteeg y Malalasekera, 1995) como se muestra en la Figura 21. Este método ha sido utilizado para resolver problemas multidimensionales en dinámica de fluidos y su aplicación en geotermia ha permitido realizar simulaciones tridimensionales de perfiles de temperatura para diferentes campos geotérmicos en México (Guerrero-Martínez y Verma, 2013; Verma y Gómez-Arias, 2014; 2016).

$$\begin{array}{cccccccccccl}
 T_{P1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & = & S_1 \\
 -a_{W2}T_{P1} & a_{P2}T_{P2} & -a_{E2}T_{P3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & = & S_2 \\
 0 & -a_{W3}T_{P2} & a_{P3}T_{P3} & -a_{E3}T_{P4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & = & S_3 \\
 0 & 0 & -a_{W4}T_{P3} & a_{P4}T_{P4} & -a_{E4}T_{P5} & 0 & 0 & 0 & 0 & = & S_4 \\
 0 & 0 & 0 & -a_{W5}T_{P4} & a_{P5}T_{P5} & a_{E5}T_{P5} & 0 & 0 & 0 & = & S_5 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & = & \cdot \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{Wn}T_{Pn-1} & a_{Pn}T_{Pn} & -a_{En}T_{Pn+1} & 0 & = & S_n \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{Pn+1} & 0 & = & S_{n+1}
 \end{array}$$

Figura 21. Aplicación del TDMA para resolver el sistema de ecuaciones del ejemplo de los 5 volúmenes de control (modificados de Versteeg y Malalasekera, 1995).

2.2.3. Modelado

Para el modelado térmico se utilizó el modelo conceptual de la litología de la caldera reportado por Vargas-Ledezma y Garduño-Monroy (1988; Figura 22). Las propiedades termofísicas de las rocas que la conforman y condiciones iniciales o de frontera se muestran en la Tablas 6 y 7. Con base a la información recopilada, se establecieron cinco modelos y en cada uno se varió sólo la profundidad de la posible cima de la cámara magmática en la caldera La Reforma, estas profundidades se establecieron en 4, 5, 6, 7 y 8 km. El espesor de la cámara magmática en cada uno de los modelos fue de 4 km, el cual fue estimado suponiendo un cilindro con un volumen de 300 km^3 y diámetro de 10 km, usando la ecuación de volumen de un cilindro ($v = h\pi r^2$) se despeja la altura h que es la que se toma como espesor de la cámara.

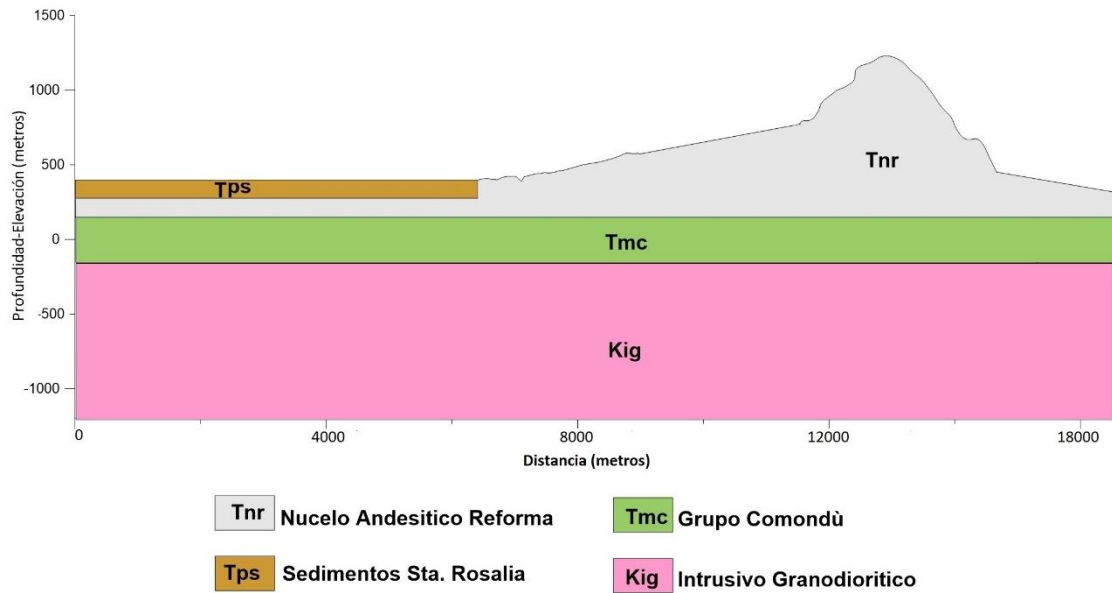


Figura 22. Esquema simple del modelo conceptual litológico de la caldera La Reforma (modificado de Vargas-Ledezma y Garduño-Monroy, 1988).

Tabla 6. Condiciones iniciales y de frontera para la modelación térmica en la caldera La Reforma.

Características físicas	Información
Condiciones de emplazamiento de la cámara magmática	
Temperatura del emplazamiento T_{emp} (°C)	1100
Espesor de la cámara (m)	4000
Modelo 1	
Cima de la cámara (m)	4000
Base de la cámara (m)	8000
Modelo 2	
Cima de la cámara (m)	5000
Base de la cámara (m)	9000
Modelo 3	
Cima de la cámara (m)	6000
Base de la cámara (m)	10000
Modelo 4	
Cima de la cámara (m)	7000
Base de la cámara (m)	11000
Modelo 5	
Cima de la cámara (m)	8000
Base de la cámara (m)	12000

Continuación Tabla 6

Condiciones de frontera

Temperatura de superficie T_s (°C)	25
Gradiente geotérmico (°C/m)	0.030
Temperatura a los 20 km de profundidad (°C)	625

Características de la malla

Altura topográfica	300
Profundidad total del modelo (m)	20000
Delta del volumen de control (m) [†]	25
Tiempo de simulación t (Ma)	1
Delta del tiempo (años) [♦]	100

[†]De acuerdo con esta longitud y dado que la profundidad total de la modelación en los cinco casos es de 20000 m, el total de número de volúmenes de control es de 200.

[♦]De acuerdo al Δt y el tiempo de simulación, el total de iteraciones realizadas para cada modelo es de 10.000.

Tabla 7. Unidades litológicas y sus propiedades termofísicas.

Capa 1: Tps, Sedimentos*	
Espesor (m)	100
Conductividad térmica (W/m°C)	1.55
Capacidad calorífica (J/kg°C)	840
Densidad (g/cm ³)	2.25
Capa 2: Tnr, Andesitas	
Espesor (m)	200
Conductividad térmica (W/m°C)	1.55
Capacidad calorífica (J/kg°C)	1230
Densidad (g/cm ³)	2.65
Capa 3: Tmc, Andesitas-Basálticas	
Espesor (m)	300
Conductividad térmica (W/m°C)	2.26
Capacidad calorífica (J/kg°C)	1230
Densidad (g/cm ³)	2.70
Capa 4: Kig, Granodiorita	
Espesor (m)	14400
Conductividad térmica (W/m°C)	2.63
Capacidad calorífica (J/kg°C)	1550
Densidad (g/cm ³)	2.72

*Todas estas propiedades son reportadas y tomadas de Robertson, 1988; Kukkonen y Lindberg, 1998; Eppelbaum et al., 2014.

Capítulo 3. Resultados y Discusión

3.1. Sismología

3.1.1. Primera campaña

En la primera campaña se instaló una red sísmica de 5 estaciones que operaron entre el mes de septiembre y octubre de 2015, con el fin de verificar la presencia de microsismicidad en la caldera. Se registraron 13 eventos sísmicos los cuales se muestran en la Tabla 8 y Figura 23, cuyas magnitudes (M_c) y profundidades varía entre 0.8 y 2.4 y entre 1 y 12 km, respectivamente. Los valores RMS de las lecturas observadas de P y S (del conjunto de eventos) va de 0.1 a 0.8 s, lo que indica una buena calidad en las lecturas realizadas (<1 s), sin embargo, los eventos tienen asociados errores horizontales de localización que merecen atención, por ejemplo, para los eventos detectados dentro de la red (2, 11 y 13; Figura 23) los errores son menores a ± 2 km y a medida que los eventos se van distanciando de la cobertura de la red, los errores se van incrementando desde ± 2 km (1, 3 y 8; Figura 24) hasta ± 4 km (4, 5, 6, 7, 9, 10 y 12; Figura 23), como se observa en la Tabla 7 y Figura 23. Debido a la falta de información para la localización focal, en algunos eventos la profundidad se fijó en 10 km (profundidad de partida en Hypocenter para determinar la localización focal). Las Figuras 24 y 25 corresponden a los perfiles sur-norte y oeste-este, que muestran la localización de los eventos en profundidad.

Tabla 8. Características generales de los eventos registrados durante la primera campaña (septiembre-octubre de 2015).

No.	Fecha	Hora (UTC)	Lat (N)	Long (W)	Prof (km)	M_c	RMS (s)	ϵ -H ($\pm$ km)	ϵ -V ($\pm$ km)
1	17-sep	9:31	27.491	112.489	10	1.1	0.2	2.0	**
2	17-sep	12:17	27.480	112.440	10	0.8	0.1	1.8	**
3	18-sep	20:33	27.457	112.461	9.5	1.7	0.1	2.0	2.7
4	19-sep	2:50	27.566	112.465	7.6	1.3	0.6	3.1	3.8
5	19-sep	3:24	27.584	112.410	1.5	1.5	0.7	3.9	4.0
6	19-sep	3:51	27.575	112.445	1.0	1.3	0.6	3.3	3.8
7	19-sep	12:46	27.549	112.403	12	1.7	0.7	3.0	3.6
8	20-sep	0:02	27.519	112.469	10	1.3	0.6	2.1	**
9	22-sep	1:44	27.555	112.373	10	1.3	0.8	4.0	**
10	27-sep	10:17	27.528	112.378	1.2	1.3	0.7	3.8	5.0
11	29-sep	6:40	27.498	112.427	10	1.3	0.5	1.9	**
12	1-oct	15:15	27.458	112.363	12.4	1.6	0.6	3.0	5.3
13	6-oct	17:05	27.477	112.413	10	2.4	0.1	1.8	**

**Estas profundidades no se tiene en cuenta el error vertical dado que están definidas por defecto en el procesamiento.

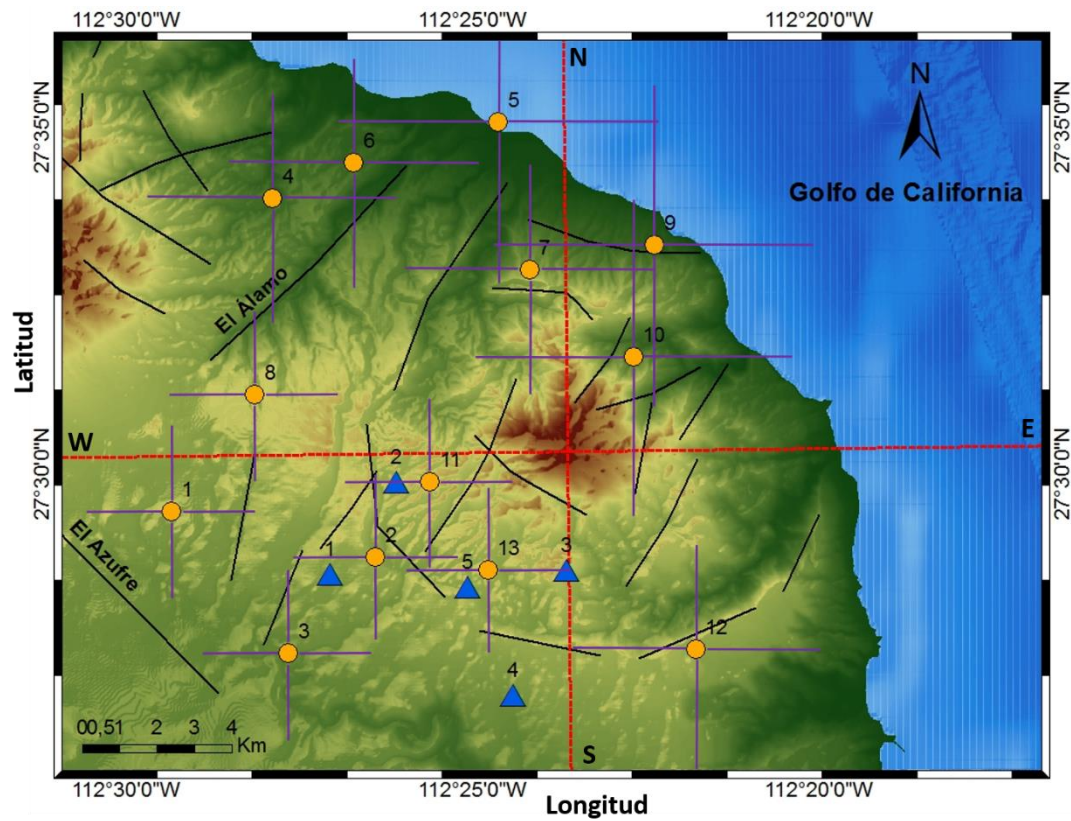


Figura 23. Distribución espacial de los eventos (círculos naranja) y errores de localización (barras de color morado). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas. Las líneas rojas representan los perfiles en dirección sur-norte y oeste-este. Las líneas negras corresponden a fallas y fracturas.

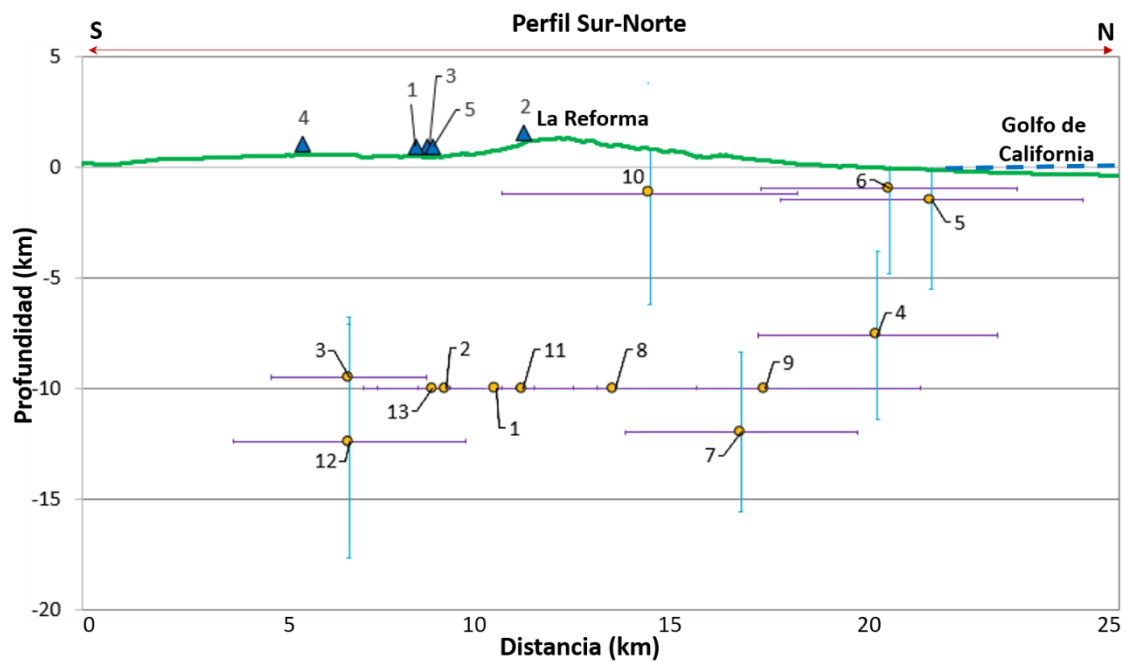


Figura 24. Distribución de los eventos en profundidad (círculos naranja). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas, y las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) a los errores de localización.

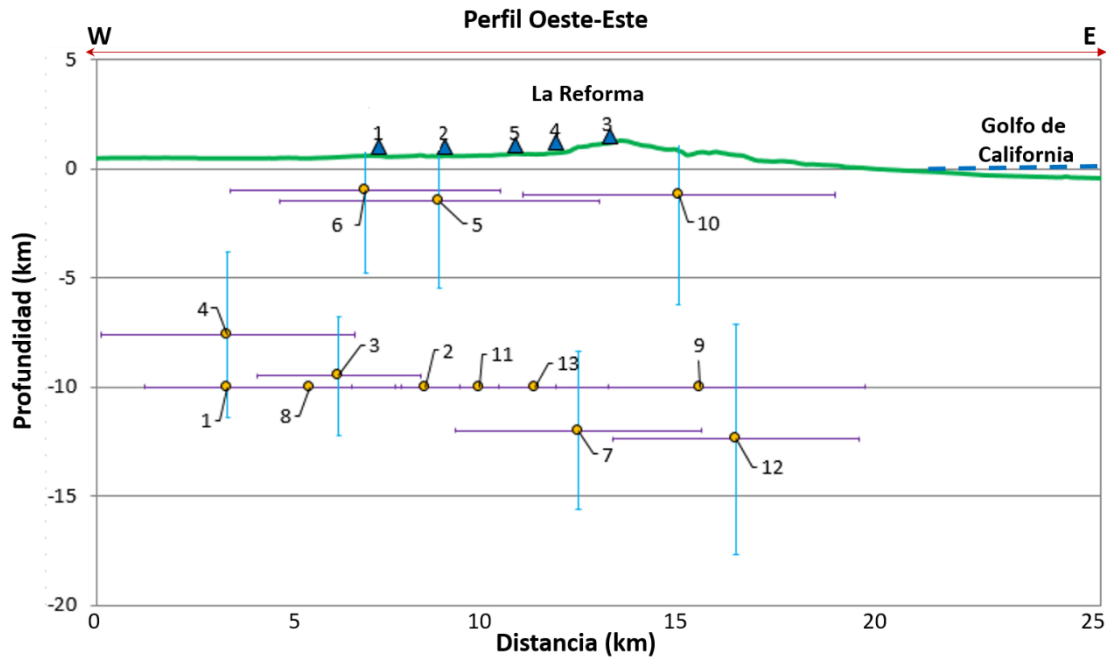


Figura 25. Distribución de los eventos en profundidad (círculos naranja). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas, y las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) a los errores de localización.

3.1.2. Segunda Campaña

Para la segunda campaña se instaló una red sísmica de 10 estaciones que operó entre los meses de abril y mayo de 2016, ampliando la cobertura en la caldera con lo que se logró registrar 25 eventos con magnitudes (M_c) entre 0.8 y 2.9 y profundidades entre 1 y 7 km. La Tabla 9 muestra las características generales de estos eventos, y la Figura 26 la distribución espacial de los mismos. Los valores de RMS de las lecturas observadas de P y S (para el conjunto de eventos) va de 0.1 a 0.9 s (indicando también una buena calidad en las lecturas). Del conjunto de eventos registrados en esta campaña, el 80% tiene incertidumbres de localización horizontal de ± 2 km y el 96% con incertidumbres en profundidad de ± 2 km. Las Figuras 27 y 28 correspondientes a los perfiles sur-norte y oeste-este, respectivamente, muestran la localización espacial de los eventos, así como la representación gráfica de los errores de localización.

Tabla 9. Características generales de los eventos registrados durante de la segunda campaña (abril-mayo de 2016).

No.	Fecha	Hora (UTC)	Lat (N)	Long (W)	Prof (km)	Mc	RMS (s)	ϵ -H ($\pm$ km)	ϵ -V ($\pm$ km)
1	22-Apr	18:21	27.463	112.405	5.4	1.9	0.1	1.2	1.8
2	27-Apr	12:56	27.469	112.394	2.8	2.9	0.3	1.5	1.7
3	3-may	17:18	27.454	112.382	1.2	2.5	0.4	1.7	1.2
4	4-may	6:30	27.554	112.400	4.3	1.2	0.8	4.2	1.8
5	4-may	17:29	27.447	112.404	2.9	1.2	0.6	2.0	1.9
6	5-may	18:05	27.443	112.350	1.5	2.7	0.8	3.0	2.0
7	8-may	22:14	27.484	112.381	1.5	1.5	0.7	1.7	1.6
8	10-may	9:19	27.494	112.398	1.5	0.8	0.5	1.6	1.4
9	10-may	13:38	27.497	112.419	2.5	1.0	0.3	1.5	1.2
10	11-may	3:07	27.505	112.478	5.5	2.2	0.5	1.6	1.4
11	11-may	9:46	27.540	112.388	6.5	1.6	0.8	4.4	1.8
12	11-may	9:54	27.466	112.374	5.6	1.3	0.9	1.5	1.6
13	12-may	13:48	27.461	112.463	6.6	1.6	0.4	1.5	1.2
14	12-may	19:07	27.463	112.313	6.7	1.8	0.9	4.8	3.0
15	13-may	16:36	27.436	112.406	7.0	1.4	0.1	1.8	1.7
16	15-may	8:11	27.473	112.421	6.3	1.6	0.5	1.6	1.8
17	15-may	15:00	27.523	112.431	1.5	1.9	0.6	2.0	1.8
18	17-may	18:02	27.509	112.452	1.2	1.4	0.5	1.7	1.5
19	18-may	1:14	27.497	112.462	3.0	1.8	0.5	1.7	1.3
20	19-may	17:46	27.465	112.353	2.5	1.7	0.4	2.4	1.8
21	20-may	1:22	27.466	112.471	6.0	1.8	0.3	1.5	1.2
22	21-may	13:05	27.447	112.436	6.5	2.0	0.3	1.5	1.6
23	22-may	19:13	27.508	112.433	1.0	2.2	0.2	1.4	1.2
24	24-may	18:10	27.431	112.374	6.5	2.2	0.6	2.0	1.8
25	28-may	13:52	27.480	112.451	5.0	1.4	0.3	1.5	1.4

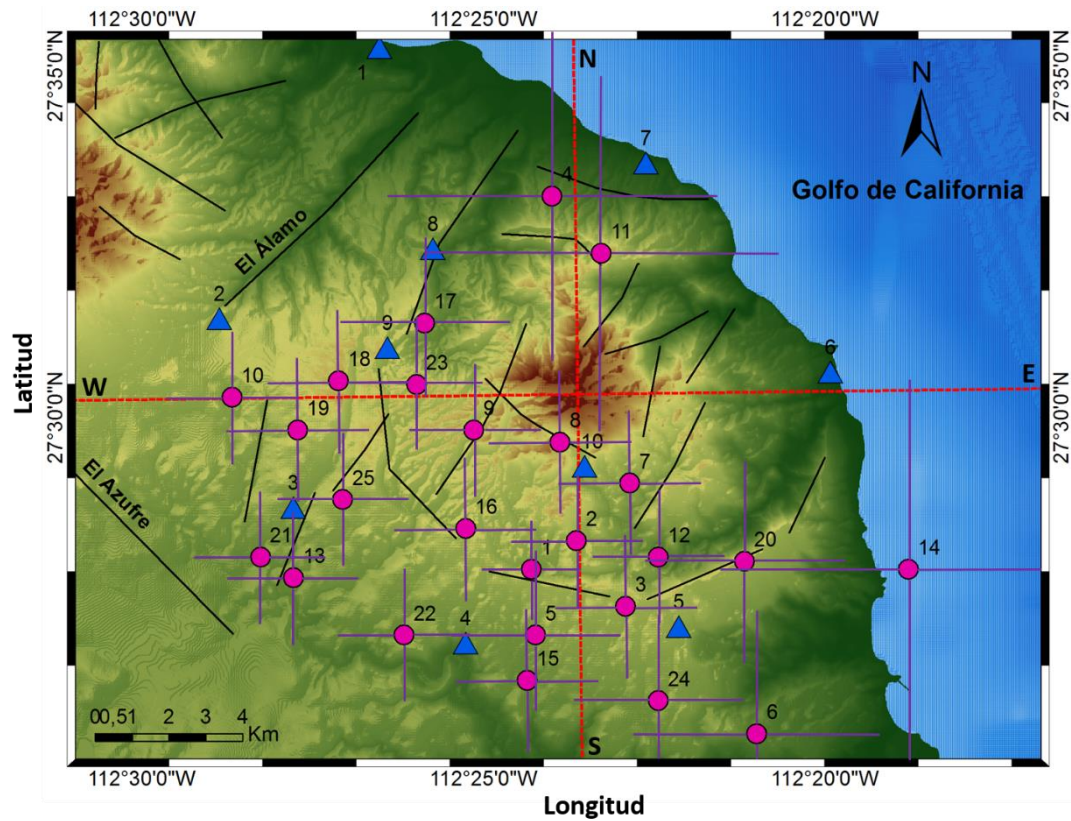


Figura 26. Distribución espacial de los eventos (círculos morados) y errores de localización (barras en morado). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas. Las líneas rojas representan los perfiles en dirección sur-norte y oeste-este. Las líneas negras corresponden a fallas y fracturas.

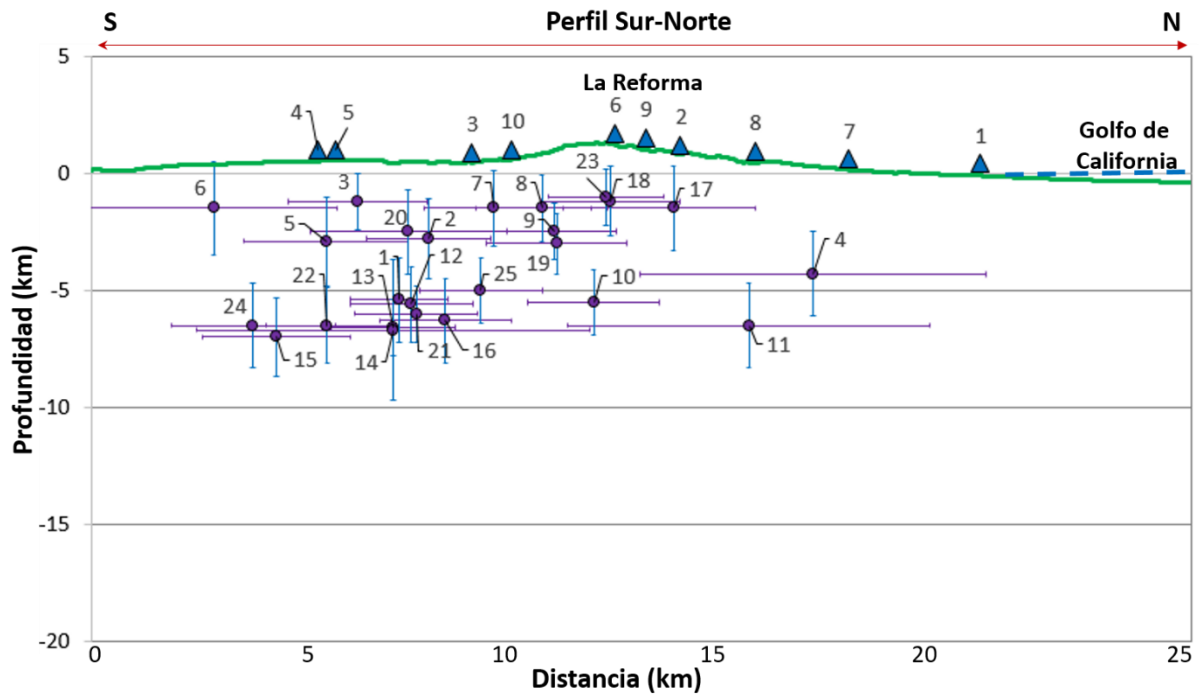


Figura 27. Distribución de los eventos en profundidad (círculos morados). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas, y las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) a los errores de localización.

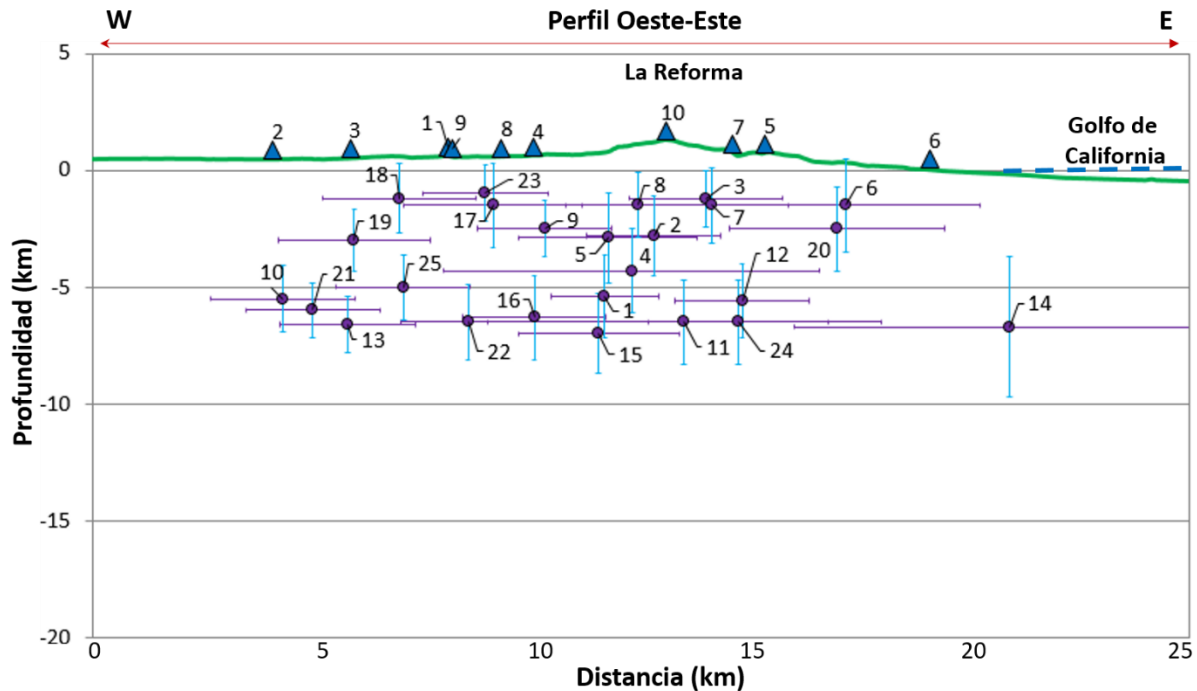


Figura 28. Distribución de los eventos en profundidad (círculos morados). Los triángulos azules corresponden a las estaciones sísmicas, y las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) a los errores de localización.

3.1.3. Catálogo de eventos

Derivado de las dos campañas realizadas se conformó el catálogo sísmico con los 38 eventos registrados en la caldera La Reforma del CVLTV (13 eventos de la primera campaña en 2015 y 25 eventos de la segunda campaña en 2016) como se muestra en la Tabla 10 y Figura 29. Las magnitudes estimadas de los eventos se encuentran entre 0.8 y 2.9 Mc, y profundidades entre 1 y 12 km. Los errores estimados de localización horizontal de ± 2 km corresponden a 25 eventos que representan el 66% del catálogo, de los cuales 16 se localizan al suroeste (SW), 4 al sureste (SE), 1 al noreste (NE) y 4 al noroeste (NW). Las profundidades determinadas de estos 25 eventos se encuentran entre 1 y 10 km con errores estimados de ± 2 km (con excepción del evento 3 con un error de ± 2.7 km como se muestra en la Tabla 10). Para el resto de los 13 eventos que corresponden al 34% del catálogo, los errores estimados de localización horizontal son mayores a ± 2 km, de los cuales 3 se localizan en suroeste (SW), 3 al sureste (SE), 2 al noreste (NE) y 5 al noroeste (NW). Las profundidades estimadas de estos 13 eventos se encuentran entre 1 y 12 km con errores estimados entre ± 1.8 y ± 5.3 km (Tabla 9 y Figura 29).

Es importante considerar que la localización de eventos sísmicos depende del número de estaciones usadas, la cobertura adecuada de la red respecto a la fuente sismogénica y el modelo de

velocidad a utilizar, el cual debe ser acorde con la estructura en estudio. Partiendo de esto, en la primera campaña se contó con un limitado número de estaciones y de cobertura, con lo que se observó que los errores de localización de los eventos se incrementan a medida que estos se distancian de la red. En la segunda campaña se contó con un número mayor de estaciones y de cobertura en la caldera pero al igual que la primera campaña, el modelo de velocidad usado no es el propio del lugar. Aquí los mayores errores de localización son de eventos ocurridos en el lado este de la caldera al igual que en la primera campaña, esto podría indicar un posible contraste en la estructura de la caldera a ambos lados de la misma y que por ello el modelo de velocidad usado tenga un mejor comportamiento en el lado oeste de la caldera (con dirección hacia las Tres Vírgenes) donde las localizaciones en profundidad tienen menor error.

Tabla 10. Catálogo de eventos sísmicos de la caldera La Reforma del Complejo Volcánico y Las Tres Vírgenes.

No.	Fecha	Hora (UTC)	Lat (N)	Long (W)	Prof (km)	Mc	RMS (s)	ϵ -H ($\pm$ km)	ϵ -V ($\pm$ km)
1	17-sep-2015	9:31	27.491	112.489	10	1.1	0.6	2.0	**
2	17-sep-2015	12:17	27.480	112.440	10	0.8	0.1	1.8	**
3	18-sep-2015	20:33	27.457	112.461	9.5	1.7	0.1	2.0	2.7
4	19-sep-2015	2:50	27.566	112.465	7.6	1.3	0.1	3.1	3.8
5	19-sep-2015	3:24	27.584	112.410	1.5	1.5	0.1	3.9	4.0
6	19-sep-2015	3:51	27.575	112.445	1.0	1.3	0.1	3.3	3.8
7	19-sep-2015	12:46	27.549	112.403	12	1.7	0.1	3.0	3.6
8	20-sep-2015	0:02	27.519	112.469	10	1.3	0.1	2.1	**
9	22-sep-2015	1:44	27.555	112.373	10	1.3	0.1	4.0	**
10	27-sep-2015	10:17	27.528	112.378	1.2	1.3	0.1	3.8	5.0
11	29-sep-2015	6:40	27.498	112.427	10	1.3	0.1	1.9	**
12	1-oct-2015	15:15	27.458	112.363	12.4	1.6	0.1	3.0	5.3
13	6-oct-2015	17:05	27.477	112.413	10	2.4	0.2	1.8	**
14	22-Apr-2016	18:21	27.463	112.405	5.4	1.9	0.1	1.2	1.8
15	27-Apr-2016	12:56	27.469	112.394	2.8	2.9	0.3	1.5	1.7
16	3-may-2016	17:18	27.454	112.382	1.2	2.5	0.4	1.7	1.2
17	4-may-2016	6:30	27.554	112.400	4.3	1.2	0.8	4.2	1.8
18	4-may-2016	17:29	27.447	112.404	2.9	1.2	0.6	2.0	1.9
19	5-may-2016	18:05	27.443	112.350	1.5	2.7	0.8	3.0	2.0
20	8-may-2016	22:14	27.484	112.381	1.5	1.5	0.7	1.7	1.6
21	10-may-2016	9:19	27.494	112.398	1.5	0.8	0.5	1.6	1.4
22	10-may-2016	13:38	27.497	112.419	2.5	1.0	0.3	1.5	1.2
23	11-may-2016	3:07	27.505	112.478	5.5	2.2	0.5	1.6	1.4
24	11-may-2016	9:46	27.540	112.388	6.5	1.6	0.8	4.4	1.8
25	11-may-2016	9:54	27.466	112.374	5.6	1.3	0.9	1.5	1.6
26	12-may-2016	13:48	27.461	112.463	6.6	1.6	0.4	1.5	1.2
27	12-may-2016	19:07	27.463	112.313	6.7	1.8	0.9	4.8	3.0
28	13-may-2016	16:36	27.436	112.406	7.0	1.4	0.1	1.8	1.7
29	15-may-2016	8:11	27.473	112.421	6.3	1.6	0.5	1.6	1.8

Continuación Tabla 10.

No.	Fecha	Hora (UTC)	Lat (N)	Long (W)	Prof (km)	Mc	RMS (s)	ϵ -H ($\pm$ km)	ϵ -V ($\pm$ km)
30	15-may-2016	15:00	27.523	112.431	1.5	1.9	0.6	2.0	1.8
31	17-may-2016	18:02	27.509	112.452	1.2	1.4	0.5	1.7	1.5
32	18-may-2016	1:14	27.497	112.462	3.0	1.8	0.5	1.7	1.3
33	19-may-2016	17:46	27.465	112.353	2.5	1.7	0.4	2.4	1.8
34	20-may-2016	1:22	27.466	112.471	6.0	1.8	0.3	1.5	1.2
35	21-may-2016	13:05	27.447	112.436	6.5	2.0	0.3	1.5	1.6
36	22-may-2016	19:13	27.508	112.433	1.0	2.2	0.2	1.4	1.2
37	24-may-2016	18:10	27.431	112.374	6.5	2.2	0.6	2.0	1.8
38	28-may-2016	13:52	27.480	112.451	5.0	1.4	0.3	1.5	1.4

**Estas profundidades no se tiene en cuenta el error vertical dado que están definidas por defecto en el procesamiento.

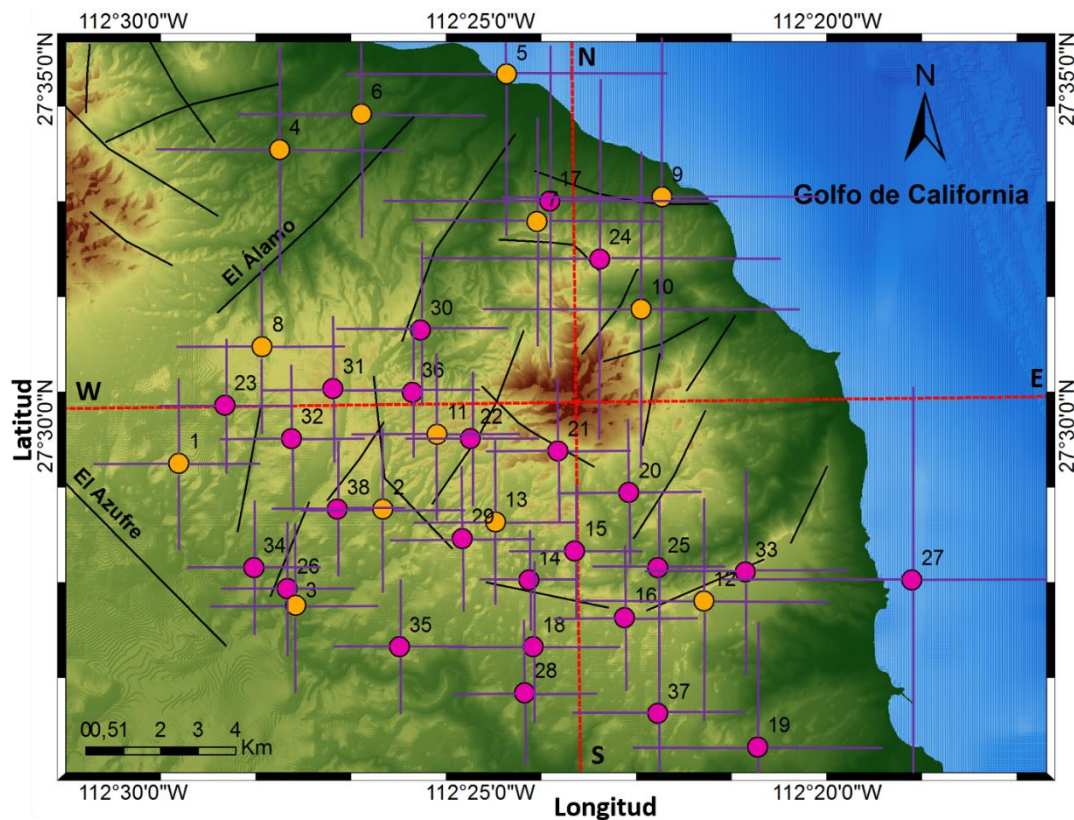


Figura 29. Localización de los eventos en la caldera La Reforma del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes. Los círculos de color naranja corresponden a los eventos registrados durante la primera campaña y los de color morado a los eventos de la segunda campaña. Las barras en color morado corresponden a los errores de localización.

Las Figuras 30 y 31 correspondiente a los perfiles sur-norte y oeste-este, respectivamente, muestran la distribución en profundidad del conjunto de eventos del catálogo de la Tabla 10 (exceptuando los que tienen profundidades fijas de 10 km). En estas Figuras se observa un posible límite a partir del cual

comienza a disminuir la ocurrencia de eventos bajo caldera La Reforma, el cual se sugiere está a los 7-8 km de profundidad.

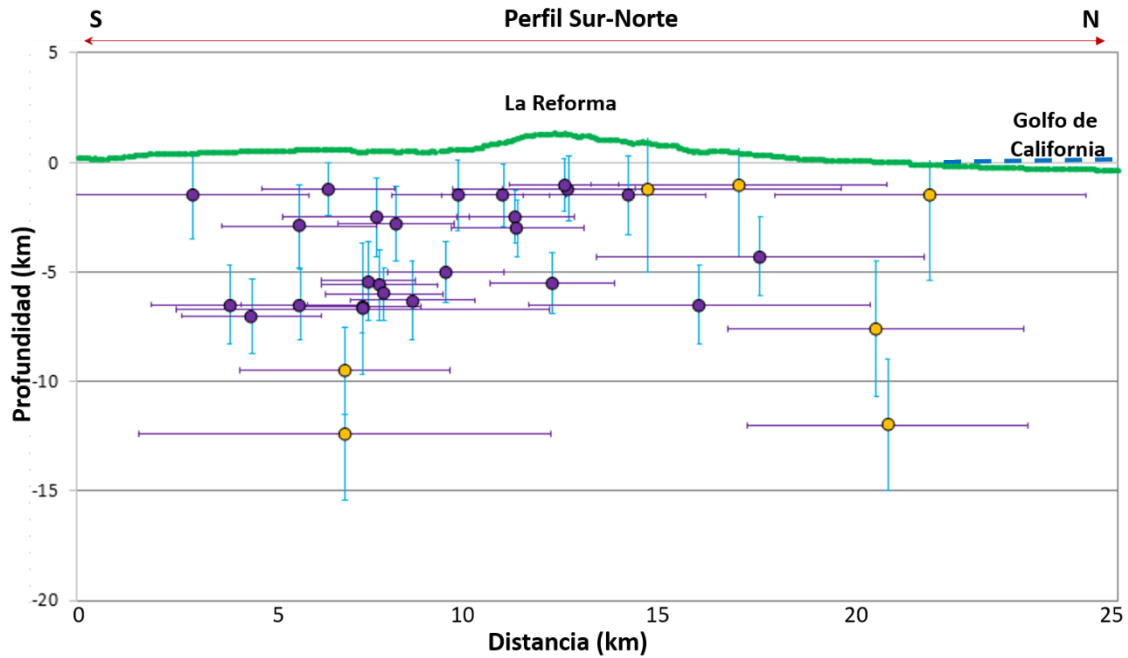


Figura 30. Distribución de eventos en profundidad. Los círculos en color naranja corresponden a los eventos de la primera campaña y los morados a los eventos de la segunda campaña. Las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) corresponden a los errores de localización.

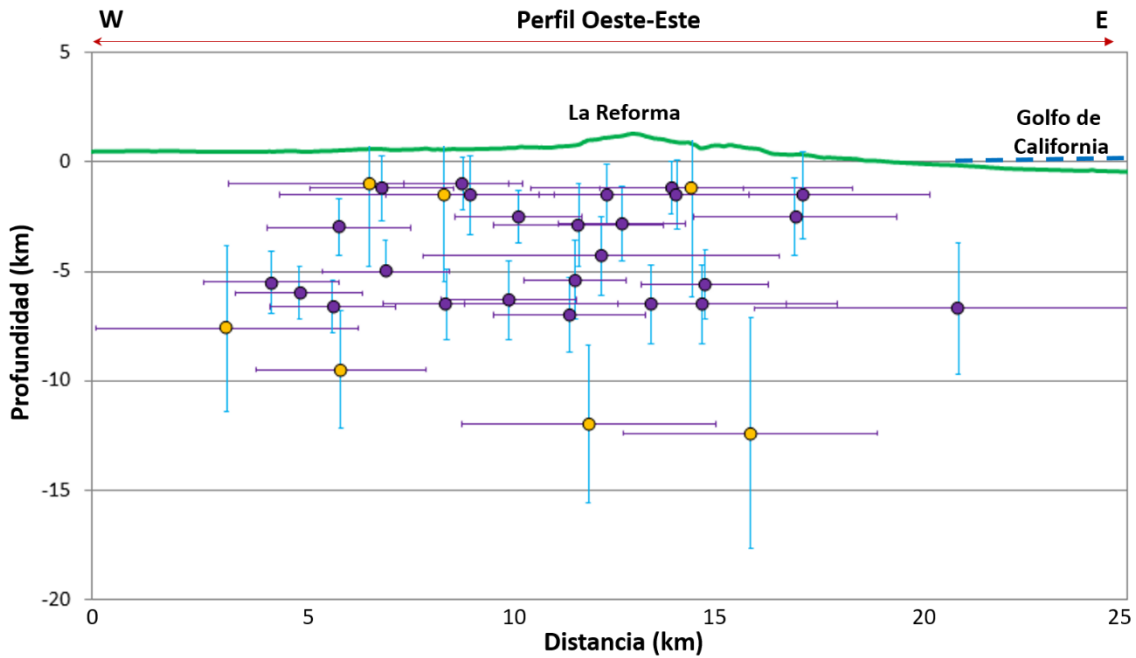


Figura 31. Distribución de eventos en profundidad. Los círculos en color naranja corresponden a los eventos de la primera campaña y los morados a los eventos de la segunda campaña. Las barras horizontales (en morado) y verticales (en azul) corresponden a los errores de localización.

3.1.4. Análisis de la sismicidad de la caldera La Reforma y Las Tres Vírgenes

Se realizó una comparación de la sismicidad registrada en la caldera La Reforma con la reportada por Macías-Carrasco (1997; eventos del año 1994), Wong (2000; eventos de año 1993) y Jiménez-Méndez (2015; eventos del año 2010) para Las Tres Vírgenes y la caldera El Aguajito (Anexo 1). El periodo de observación del catálogo de la caldera La Reforma es de un mes (suma de todos los días en que se registraron eventos por ambas redes) y es el mismo tiempo usado para hacer la comparación con los catálogos mencionados (en estos también se sumaron los días de eventos registrados hasta completar un mes. La Figura 32 muestra la distribución de los catálogos empleados para esta comparación.

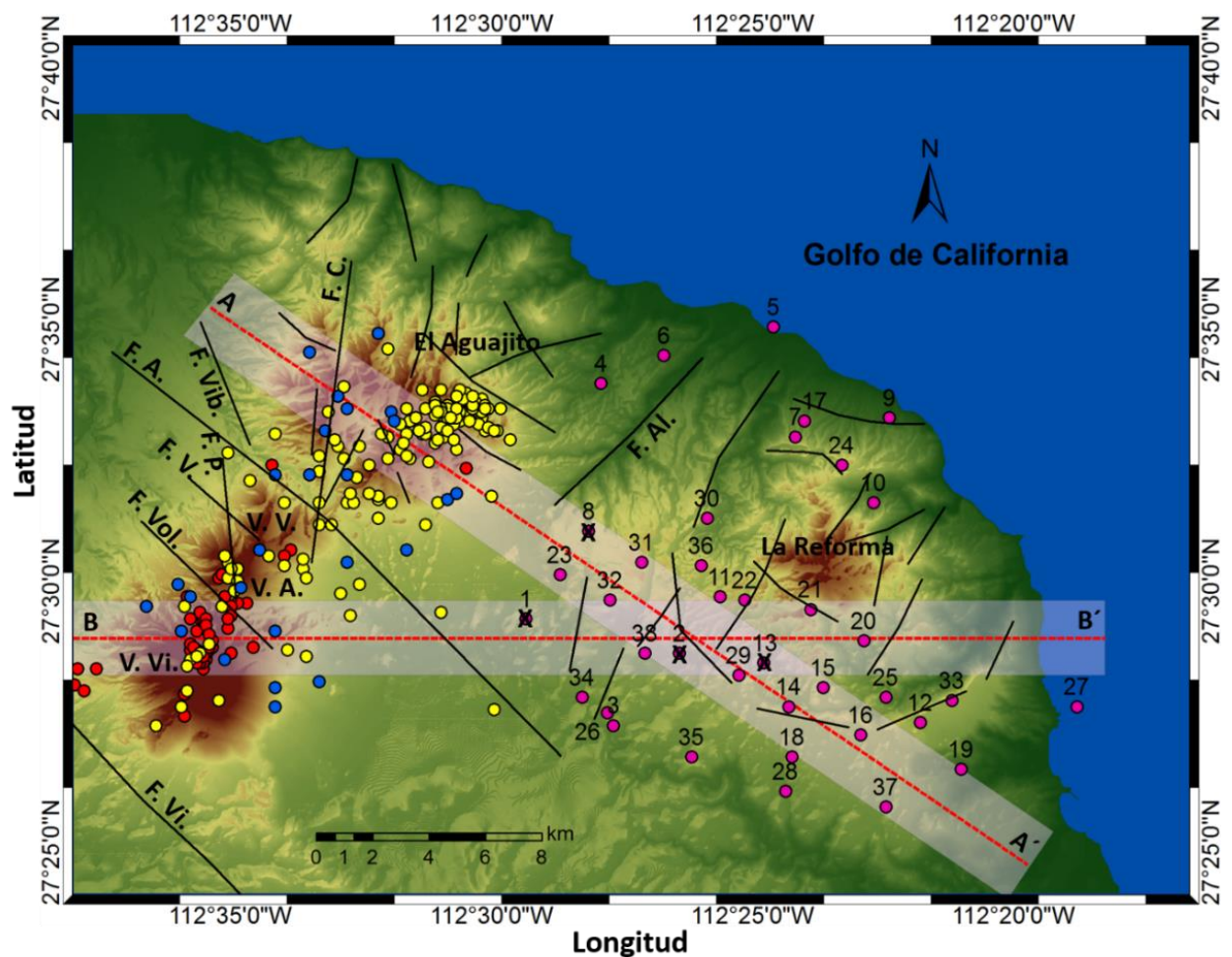


Figura 32. Localización de eventos en el Complejo Volcánico Las Tres Vírgenes. Los puntos en color morado corresponden a los eventos del catálogo de la caldera La Reforma, los azules de Macías-Carrasco (1997), los amarillos de catálogo de Wong (2000) y los rojos de Jiménez-Méndez (2015). A-A' y B-B' son perfiles definidos con un ancho de 2 km y las líneas negras corresponden a fracturas y fallas: El Cimarrón (F. C.), Las Víboras (F. Vib.), El Azufre (F.A.), El Partido (F.P.), El Viejo (F.V.), El Volcán (F. Vol.), La Virgen (F. Vi.) y El Álamo (F. Al.). También se encuentran los volcanes El Viejo (V.V.), El Azufre (V.A.) y La Virgen (V. Vi.). Los eventos marcados con x corresponden a los microsismos con profundidad fija de 10 km.

Para realizar la comparación se trazaron dos perfiles A-A' y B-B' en la zona, el primero conecta la caldera La Reforma con la caldera El Aguajito y el segundo conecta la caldera La Reforma con el volcán La Virgen y parte del volcán El Azufre (Figura 32). Las Figuras 33-38 muestran la distribución en profundidad de los eventos de los catálogos empleados con relación a los perfiles mencionados, tomando en cuenta solo los eventos que estén dentro del ancho de los 2 km de cada perfil (Figura 32). En el caso de la caldera La Reforma los eventos usados para la comparación se muestran en la Tabla 11 y 12, excluyendo los eventos que tiene profundidad fija de 10 km (en la Figura 32 se encuentran con una x).

Tabla 11. Eventos de la caldera La Reforma para el perfil A-A'

No.*	Fecha	Hora	Lat	Long	Prof	Mc
		(UTC)	(N)	(W)	(km)	
2	17-sep-2015	12:17	27.480	112.440	10 [†]	0.8
8	20-sep-2015	0:02	27.519	112.469	10 [†]	1.3
13	6-oct-2015	17:05	27.477	112.413	10 [†]	2.4
14	22-Apr-2016	18:21	27.463	112.405	5.4	1.9
15	27-Apr-2016	12:56	27.469	112.394	2.8	2.9
16	3-may-2016	17:18	27.454	112.382	1.2	2.5
19	5-may-2016	18:05	27.443	112.350	1.5	2.7
23	11-may-2016	3:07	27.505	112.478	5.5	2.2
29	15-may-2016	8:11	27.473	112.421	6.3	1.6
31	17-may-2016	18:02	27.509	112.452	1.2	1.4
32	18-may-2016	1:14	27.497	112.462	3.0	1.8
37	24-may-2016	18:10	27.431	112.374	6.5	2.2
38	28-may-2016	13:52	27.480	112.451	5.0	1.4

*Esta numeración se relaciona con la Tabla 9.

[†]Eventos excluidos

Tabla 12. Eventos de la caldera La Reforma para el perfil B-B'

No.*	Fecha	Hora	Lat	Long	Prof	Mc
		(UTC)	(N)	(W)	(km)	
1	17-sep-2015	9:31	27.491	112.489	10 [†]	1.1
2	17-sep-2015	12:17	27.480	112.440	10 [†]	0.8
13	6-oct-2015	17:05	27.477	112.413	10 [†]	2.4
20	8-may-2016	22:14	27.484	112.381	1.5	1.5
21	10-may-2016	9:19	27.494	112.398	1.5	0.8
38	28-may-2016	13:52	27.480	112.451	5.0	1.4

*Esta numeración se relaciona con la Tabla 9.

[†]Eventos excluidos

De los eventos registrados en 1994 reportados por Macías-Carrasco (1997) que se muestran en el perfil A-A' (Figura 33), se observa que estos ocurren bajo la caldera El Aguajito entre 6 y 9 km de profundidad y son menor en número que los eventos de la caldera La Reforma, los cuales encuentran entre 1 y 7 km de profundidad con una distribución dispersa. En el perfil B-B' (Figura 34) se puede apreciar que bajo el volcán La Virgen la cantidad de eventos solo es mayor por un evento respecto a la caldera La Reforma, y se encuentran entre 1 y 4 km de profundidad. En caldera La Reforma los eventos se encuentran entre 1 y 5 km de profundidad.

En el caso de los eventos registrados en 1993 reportados por Wong (2000), se observa que en el perfil A-A' que conecta la caldera La Reforma con la caldera El Aguajito (Figura 33), la sismicidad ocurrida en esta caldera son más numerosos respecto a La Reforma y se concentran a una profundidad entre 5 y 7 km. En el caso de La Reforma, los eventos someros (menor o igual a ± 3 km de profundidad) no siguen ninguna tendencia respecto a algún lineamiento de fracturas o fallas mostradas en los mapas. En el perfil B-B' que conecta el volcán La Virgen con la caldera La Reforma (Figura 34), se puede apreciar que bajo el volcán La Virgen la distribución de los eventos es dispersa, los cuales ocurren entre 1 y 8 km de profundidad. Estos eventos también son mayores en número respecto de los eventos de La caldera Reforma (solo 3 eventos), los cuales ocurren entre 1 y 5 km de profundidad.

Para los eventos registrados en 2010 reportados por Jiménez-Méndez (2015) mostrados en el perfil A-A' (Figura 33) se puede apreciar que solo hay un evento bajo la caldera El Aguajito a los 7 km de profundidad, es decir, para este caso la sismicidad es mucho menor respecto a caldera La Reforma. En el perfil B-B' (Figura 34) se observa que bajo el volcán La Virgen la cantidad de eventos es mayor respecto a La Reforma y se concentran entre 3 y 5 km de profundidad. La mayor concentración bajo el volcán La Virgen puede deberse a que el trabajo de Jiménez-Méndez (2015) se enfocó a la sismicidad inducida por la actividad de un pozo.

Las Figuras 33 y 34 muestra la comparación en conjunto de todos los catálogos empleados donde se involucra sus respectivos errores de localización para ambos perfiles, con la excepción del catálogo Jiménez-Méndez (2015) el cual no divulga estas incertidumbres.

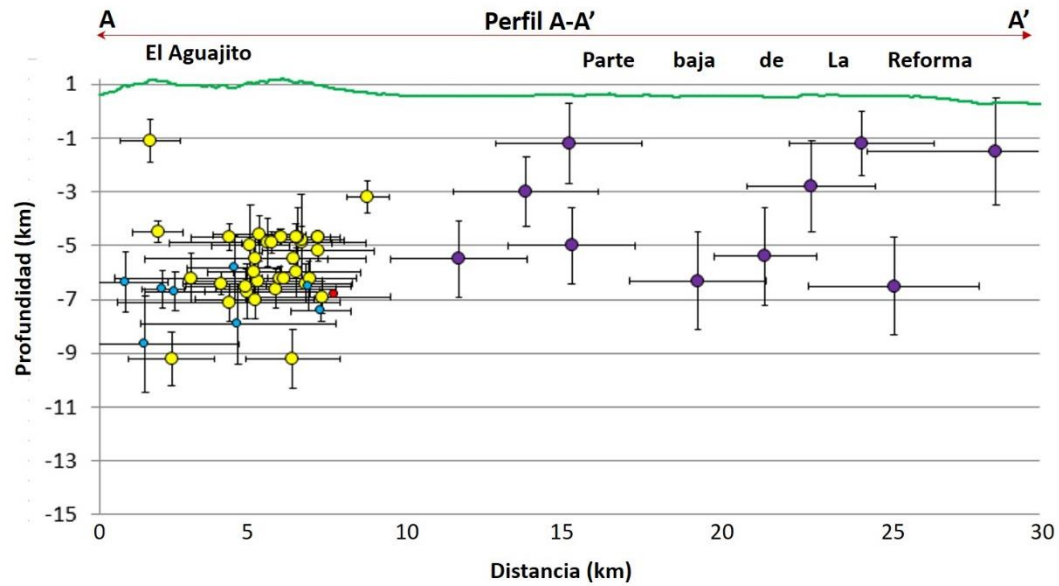


Figura 33. Distribución de eventos en profundidad. Los puntos en color morado corresponden a los eventos del catálogo de la caldera La Reforma, los azules de Macías-Carrasco (1997), los amarillos de catálogo de Wong (2000) y los rojos de Jiménez-Méndez (2015). Las barras horizontales y verticales en color negro corresponden a los errores de localización.

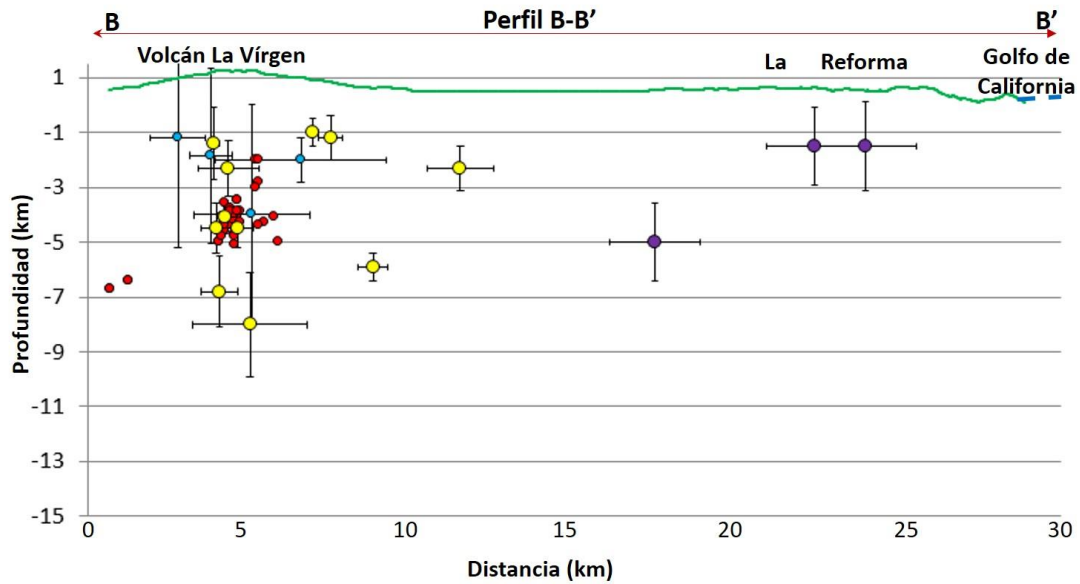


Figura 34. Distribución de eventos en profundidad. Los puntos en color morado corresponden a los eventos del catálogo de la caldera La Reforma, los azules de Macías-Carrasco (1997), los amarillos de catálogo de Wong (2000) y los rojos de Jiménez-Méndez (2015). Las barras horizontales y verticales en color negro corresponden a los errores de localización.

De acuerdo con lo observado en las Figuras de los perfiles A-A' y B-B' (Figuras 33 y 34) se puede apreciar que la ocurrencia de sismicidad en la caldera La Reforma es menor respecto a la caldera El Aguajito y el volcán La Virgen, para el mismo tiempo de observación. La sismicidad que se presenta en caldera El Aguajito tiende a concentrarse a una profundidad entre 4 y 8 km, y en el volcán La Virgen, los eventos se concentran entre 1 y 5 km de profundidad, esta tendencia no se percibe en la caldera La Reforma donde el comportamiento de la sismicidad es más bien dispersa, contrario a lo que sucede, por ejemplo, en El Aguajito. Por otro lado, los errores de localización de los catálogos empleados, en general, son comparables en cuanto a sus localizaciones, por lo tanto, la distribución en profundidad parece indicar similitud entre el Volcán La Virgen y la caldera La Reforma, en cambio la caldera El Aguajito presenta concentración a mayor profundidad. En general, de acuerdo a la distribución en profundidad, se aprecia una mayor concordancia entre la sismicidad de la caldera La Reforma y el volcán La Virgen, que se distribuyen en un rango de profundidades más amplio, entre 1 y 8 km. La sismicidad de la caldera El Aguajito, por otro lado, parece más concentrada a mayores profundidades que en la caldera La Reforma y el volcán La Virgen, entre 4 y 8 km de profundidad.

En cuanto a los eventos someros (menor a 3 km de profundidad) observados en todos los perfiles A-A' que no siguen ninguna tendencia respecto a alguna fractura o falla que se muestran en los mapas, sin embargo, se puede ver una alineación en diagonal desde 1 km hasta un poco más de 5 km de profundidad, posiblemente puedan estar relacionados con algún rasgo geológico en profundidad y esto puede ser un tema de investigación a futuro, ya que los estudios geológicos que detallen y describan rasgos estructurales específicos de la caldera La Reforma son muy limitados, por ahora solo se tiene conocimiento del trabajo de Vargas-Ledezma y Garduño-Monroy (1988), donde se hicieron inferencias generales de fallas y fracturas en la superficie de la zona (también reportadas en la cartografía del INEGI), sin embargo, no hay estudios geofísicos que las corroboren.

3.1.5. Mecanismos focales

La evolución geomorfológica y estructural de una caldera de tipo resurgente como La Reforma, tiene relación con etapas de inflexión-deflexión debido a procesos de reinyección de magma y erupciones a través del tiempo (Acocella *et al.*, 2000). En consecuencia, la resurgencia puede reactivar fallas pre-existentes (Francis, 1993; Acocella *et al.*, 2000; Waite y Smith, 2002; Foulger *et al.*, 2004; Hill, 2005). Un reflejo de la heterogeneidad estructural de este tipo de caldera es su comportamiento caótico en periodos de actividad volcánica, por ejemplo, cuando los bloques de corteza no caen con una tendencia de

“embudo” si no de manera alternada y transcurriendo horizontalmente uno con respecto a otro; también en periodos de reposo o de no actividad volcánica esta no uniformidad se manifiesta en la complejidad del fallamiento de la caldera (Cole *et al.*, 2005). Por lo tanto, la actividad de la tectónica local o de fallamiento de una caldera puede ser diversa o presentar alguna tendencia en su régimen de deformación. Una de las maneras de analizar y caracterizar (de ser posible) procesos de deformación, es a partir de la determinación de mecanismos focales de eventos sísmicos ocurridos en estos lugares (Pickering-White *et al.*, 2009).

En este sentido, para la caldera La Reforma se determinó el mecanismo focal de 20 microsismos, de los cuales se obtuvieron 4 soluciones de falla normal y 6 normales con componente lateral, 4 inversos y 6 inversos con componente lateral (Tabla 13 y Anexo 2); estas variaciones en el fallamiento pueden estar reflejando la heterogeneidad del lugar. Por otro lado, no se observa una clara relación entre los mecanismos focales determinados (menor o igual a ± 3 km de profundidad) con las fallas de la zona (Figura 35), lo que sugiere que los eventos podrían estar asociados a otras pequeñas fallas o fracturas.

Tabla 13. Solución de mecanismos focal para eventos seleccionados de la caldera La Reforma.

No.*	Fecha	Localización				Plano de falla A			Plano de falla B			Tipo de solución [†]
	d-m-a	Lat (°N)	Long (°W)	Prof (Km)	Mc	Rumbo	Buza- miento	Desliza- miento	Rumbo	Buza- miento	Desliza- miento	
						φ	δ	λ	φ	δ	λ	
14	22/04/2016	27.463	112.405	5.4	1.9	27	52	-121	251	48	-58	Normal oblicuo
15	27/04/2016	27.469	112.394	2.8	2.9	77	28	20	330	82	120	Inverso oblicuo
16	3/05/2016	27.454	112.382	1.2	2.5	48	45	-44	178	55	-130	Normal oblicuo
18	4/05/2016	27.447	112.404	2.9	1.2	133	20	78	326	70	95	Inverso
20	8/05/2016	27.484	112.381	1.5	1.5	18	88	34	289	60	175	Inverso oblicuo
21	10/05/2016	27.494	112.398	1.5	0.8	68	48	98	236	44	80	Inverso
22	10/05/2016	27.497	112.419	2.5	1.0	78	61	-81	240	30	-110	Normal
23	11/05/2016	27.505	112.478	5.5	2.2	80	43	-70	230	50	-109	Normal
25	11/05/2016	27.466	112.374	5.6	1.3	100	60	78	300	30	110	Inverso
26	12/05/2016	27.461	112.463	6.6	1.6	28	77	98	171	15	60	Inverso
28	13/05/2016	27.436	112.406	7.0	1.4	85	57	158	186	70	30	Inverso oblicuo
29	15/05/2016	27.473	112.421	6.3	1.6	98	78	138	198	50	15	Inverso oblicuo
30	15/05/2016	27.523	112.431	1.5	1.9	125	70	-121	4	40	-35	Normal oblicuo
31	17/05/2016	27.509	112.452	1.2	1.4	80	44	-70	232	48	-111	Normal
32	18/05/2016	27.497	112.462	3.0	1.8	10	43	20	265	80	130	Inverso oblicuo
34	20/05/2016	27.466	112.471	6.0	1.8	28	68	-21	125	68	-150	Normal oblicuo
35	21/05/2016	27.447	112.436	6.5	2.0	117	48	158	220	78	40	Inverso oblicuo
36	22/05/2016	27.508	112.433	1.0	2.2	87	68	-21	185	70	-160	Normal oblicuo
37	24/05/2016	27.431	112.374	6.5	2.2	38	66	-121	275	38	-40	Normal oblicuo
38	28/05/2016	27.480	112.451	5.0	1.4	36	18	-105	232	72	-85	Normal

*Esta numeración se relaciona con la Tabla 10.

[†]De acuerdo con Cronin (2010), se determinó el tipo de falla con relación al ángulo de deslizamiento λ (*deslizamiento*) del plano de falla, el cual se expresa de manera general sin mencionar la componente lateral de deslizamiento debido a la ambigüedad de las dos soluciones, ya que dependiendo de la selección del plano adecuado se podrá detallar dicha componente.

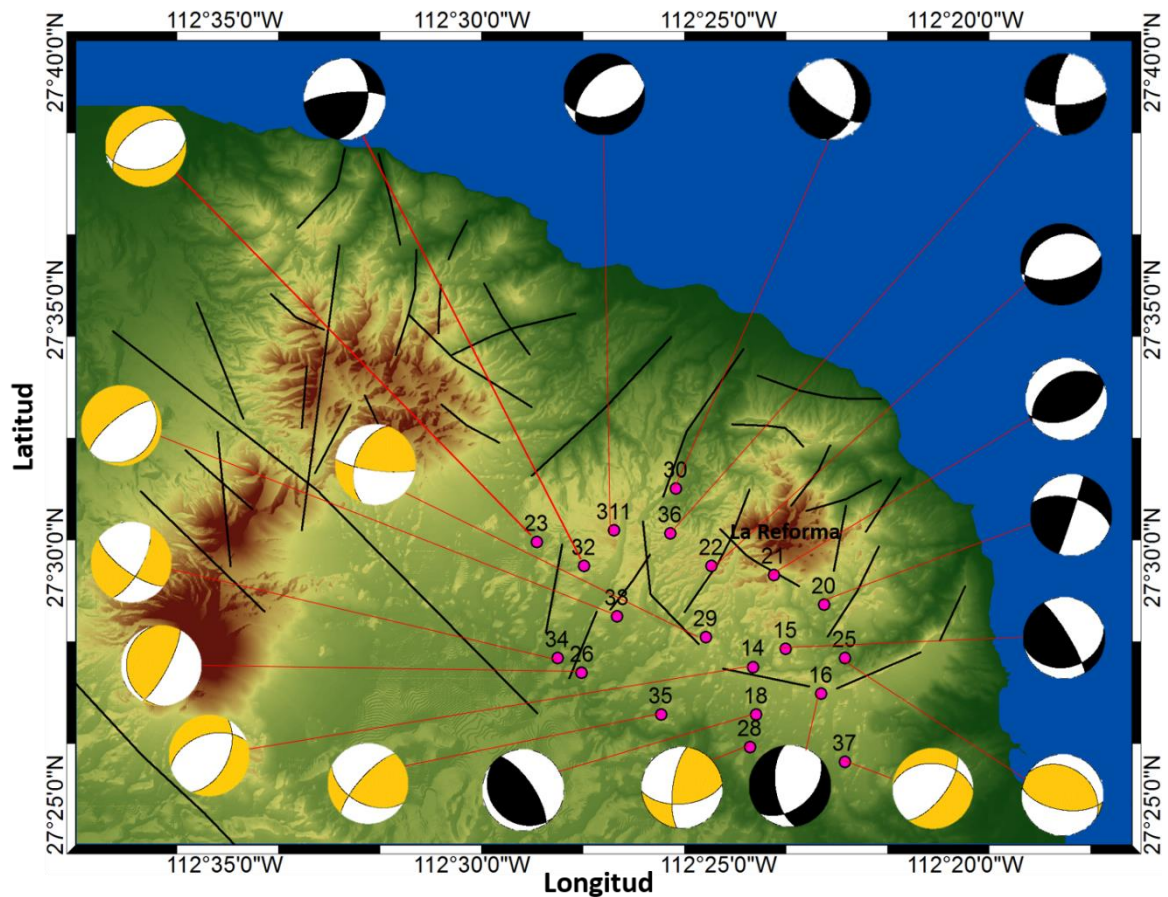


Figura 35. Mecanismos focales de los eventos seleccionados. Los puntos de color morado corresponden a la localización de los microsismos y las “bolas de playa” a su mecanismo focal, los de color negro corresponden a los eventos someros y en naranja a los profundos (>3 km).

En el trabajo de Wong (2000) las soluciones para los eventos registrados en Las Tres Vírgenes indican fallamiento de rumbo dominante en dirección NW-SE y en el trabajo de Antayhua-vera *et al.* (2015) sugieren que además del fallamiento de rumbo, domina el fallamiento de tipo normal debido a la interacción de esfuerzos de tensión. Estos autores señalan que la tectónica controlaría en general el vulcanismo, la actividad geotérmica y sísmica en el CVLTV. En el caso de la caldera La Reforma, la tectónica local igualmente podría estar controlando la actividad sísmica y como se mencionó anteriormente, las soluciones de los mecanismos focales, hasta el momento, no reflejan un fallamiento dominante, más bien, la heterogeneidad del lugar. Esta interpretación puede deberse a limitada información que se tiene aún de caldera La Reforma, ya que los trabajos mencionados de Wong (2000) y de Antayhua-vera *et al.* (2015), tienen mayor información pues sus periodos de registro de actividad sísmica se extienden de meses a años.

3.1.6. Análisis de señales

Se analizaron las señales sísmicas de los eventos registrados en la caldera La Reforma en el dominio del tiempo y de la frecuencia. En el dominio del tiempo fue posible identificar el arribo de ondas P, S y la caída de Coda y en el dominio de la frecuencia se analizó la distribución de las amplitudes de energía de los registros desde su inicio hasta su decaimiento.

En la Figura 36 se muestra a manera de ejemplo los eventos 9 y 30 (de la Tabla 10) registrados en la primera campaña y en la segunda campaña, respectivamente (el resto de eventos pueden consultarse en el Anexo 3), en ambos casos es posible identificar el arribo de P, S y la caída de la señal o Coda. En el primer evento (Figura 36a) las mayores amplitudes están en el rango de 4.5 a 14.5 Hz con una máxima amplitud en 9 Hz y en el segundo evento (Figura 36b) las mayores amplitudes se encuentran en un rango de 5 a 16 Hz con una máxima amplitud en 8 Hz.

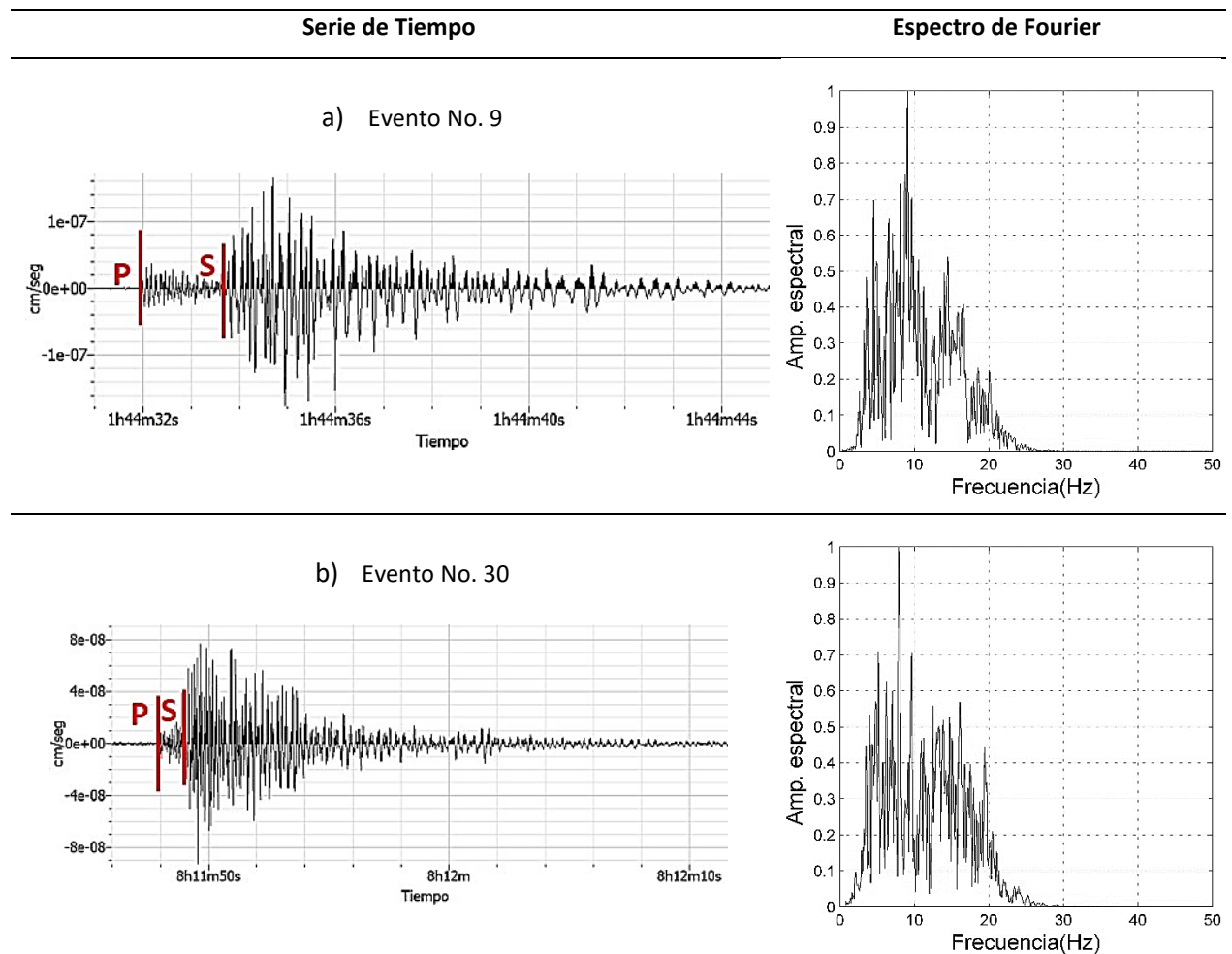


Figura 36. Ejemplo de la serie de tiempo y espectro de Fourier de eventos de la campaña 1 (a) y la campaña 2 (b).

El ancho de banda en frecuencia de las señales queda definido de 4 Hz a 17 Hz, esto considerando las amplitudes hasta -3 decibeles (dB) del máximo (Aprox. 0.7; Figura 37). El paquete de mayor energía estaría delimitado por el rango de frecuencias dentro del cual se presente la mayor cantidad de amplitudes máximas o frecuencias dominantes, que está entre 6 y 15 Hz (Figura 37). Jiménez-Martínez (2015) reporta para Las Tres Vírgenes un rango de frecuencias entre 4 a 17 Hz aproximadamente y un rango de frecuencias en donde se presentan mayor amplitud entre 5 y 13 Hz.

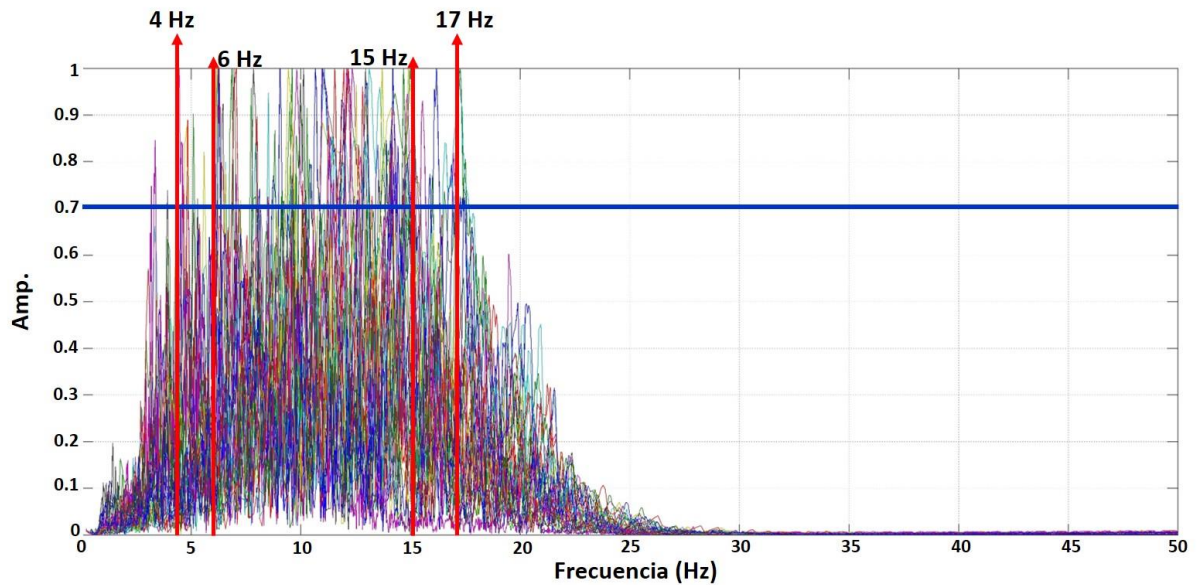


Figura 37. Conjuntos de espectros normalizados de los eventos registrados en la caldera La Reforma.

Respecto al dominio del tiempo, las señales tienen similitud con eventos tipo vulcano-tectónicos (VT) que se reportan en la literatura (Figura 38), sin embargo, dado que no hay evidencia de que estos eventos estén relacionados con algún tipo de fracturamiento del medio debido al transporte de fluidos geotérmicos, se sugiere que la génesis de estos eventos puede obedecer a la actividad de la tectónica local (propia de la estructura).

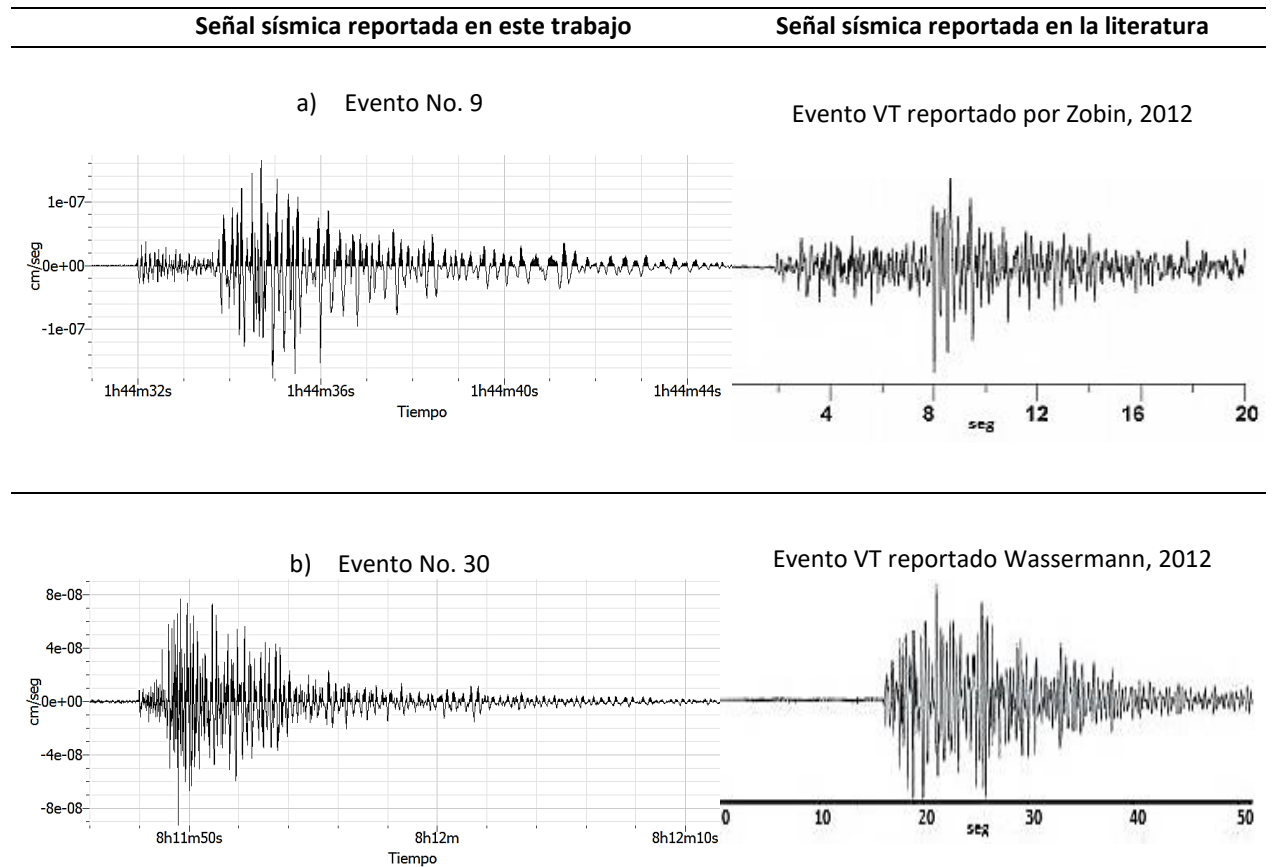


Figura 38. Ejemplo de señales reportadas en este trabajo respecto a las reportadas en la literatura. Señal de la campaña 1 (a) y campaña 2 (b).

3.2. Modelado térmico

3.2.1. Validación

El modelo numérico desarrollado en 1D para la simulación térmica (escrito en Fortran) bajo la caldera La Reforma, fue validado con los perfiles de temperaturas de los pozos LV-3 y LV-4 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, a partir de una comparación entre las temperaturas simuladas con las registradas en los pozos. La información de los registros del perfil de temperaturas de los pozos LV-3 y LV-4 se tomaron del trabajo reportado por Verma *et al.* (2006) los cuales se muestran en las Figuras 39 y 40. Para la simulación de las temperaturas, la cima de la cámara magmática (fuente de calor) se emplazó a 4 km de profundidad con un espesor de 7 Km (base de la cámara localizado a 11 Km) considerando 4 temperaturas de emplazamiento del magma de 1300, 1200, 1100 y 1000°C; el tiempo total de simulación en todos los casos fue de 0.65 Ma (Guerrero-Martínez y Verma; 2013). La información de las propiedades termofísicas de las rocas que componen la litología de Las Tres Vírgenes fue consultada de Guerrero-Martínez y Verma (2013), dicha litología tiene relación con la de los pozos LV-3 y LV-4 (Figura 41).

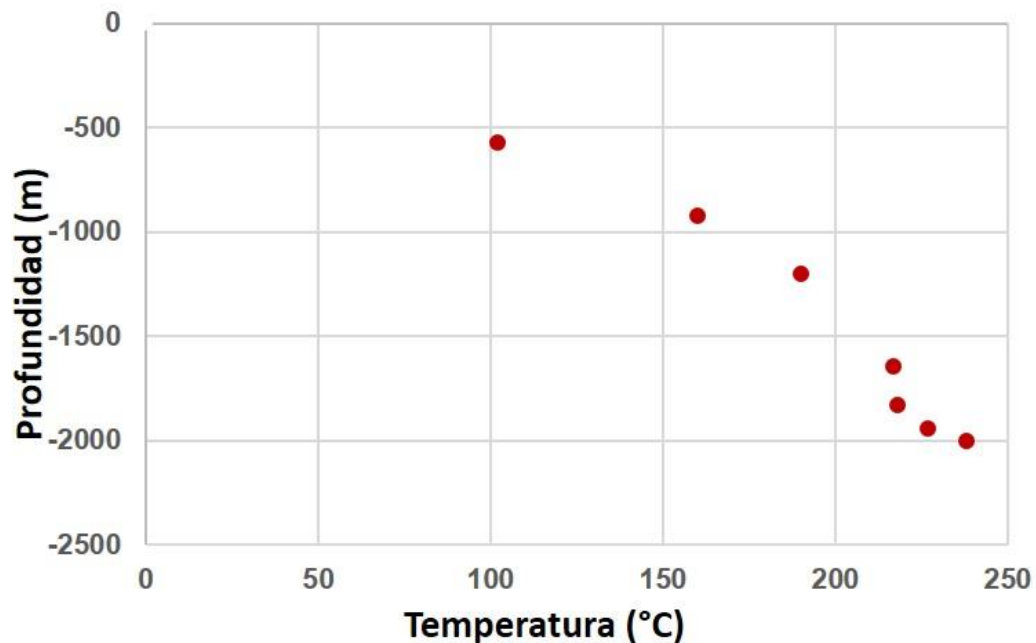


Figura 39. Registro de temperaturas en el pozo LV-3 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes.

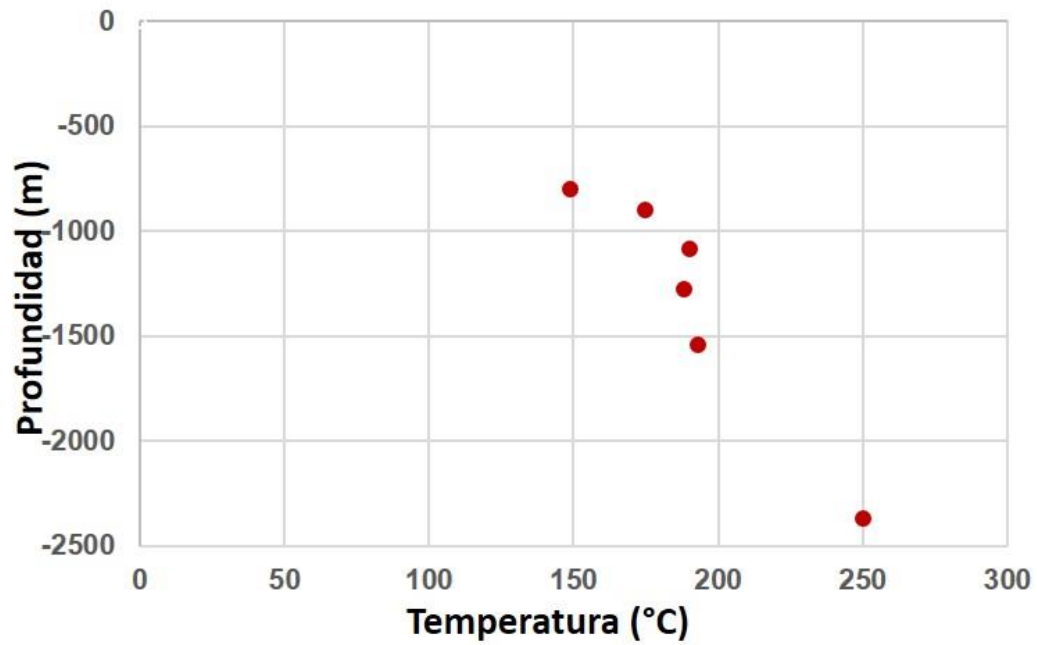


Figura 40. Registro de temperaturas en el pozo LV-4 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes.

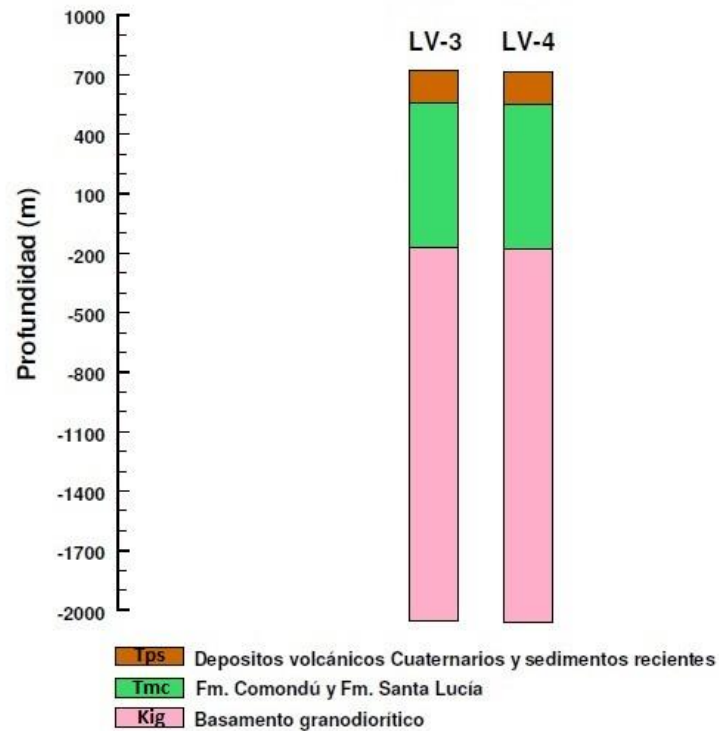


Figura 41. Litología de los pozos LV-3 y LV-4 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes (modificado de CFE, 1994 y Viggiano-Guerra *et al.*, 2009).

Los 4 modelos térmicos fueron comparados con las temperaturas registradas en los pozos LV-3 y LV-4 como se muestra en la Figura 42 en la cual se puede observar que entre la profundidad de 500 y 1300 m las temperaturas de los pozos se encuentran dentro del rango de 100 y 190°C, luego entre 1300 y 2400 m las temperaturas varían de 190 a 250°C. De lo anterior se presentan dos situaciones: 1) en el primer caso las temperaturas observadas de los pozos se encuentran dentro del rango de temperaturas de los modelos de 1000 y 1100°C, presentándose una buena correlación como lo indican los valores residuales (Tablas 14 y 15) principalmente a profundidades someras; 2) en el segundo caso las temperaturas observadas de los pozos a mayor profundidad no presentan un buen ajuste con los 4 modelos propuestos, esto se nota a partir de la profundidad de 1300 m donde los residuales son mayores (Tablas 14 y 15). Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Guerrero-Martínez y Verma (2013), además de que los autores atribuyen que las discrepancias entre las temperaturas simuladas (de acuerdo al mecanismo de transferencia de calor conductivo en estado transitorio) y observadas en pozos de Las Tres Vírgenes, se debe a procesos convectivos de actividad hidrotermal que inciden en el comportamiento térmico a medida que aumenta la profundidad. En este caso, dichas discrepancias podrían resolverse teniendo en cuenta el mecanismo de transferencia de calor conductivo-convectivo en estado transitorio, procesos petrológicos en la cámara magmática como la reinyección de magma y aporte de calor radiogénico (Guerrero-Martínez y Verma, 2013). Por consiguiente, se considera que el modelado térmico 1D puramente conductivo bajo la caldera La Reforma es solo una aproximación a lo que podría ser las condiciones reales de temperatura.

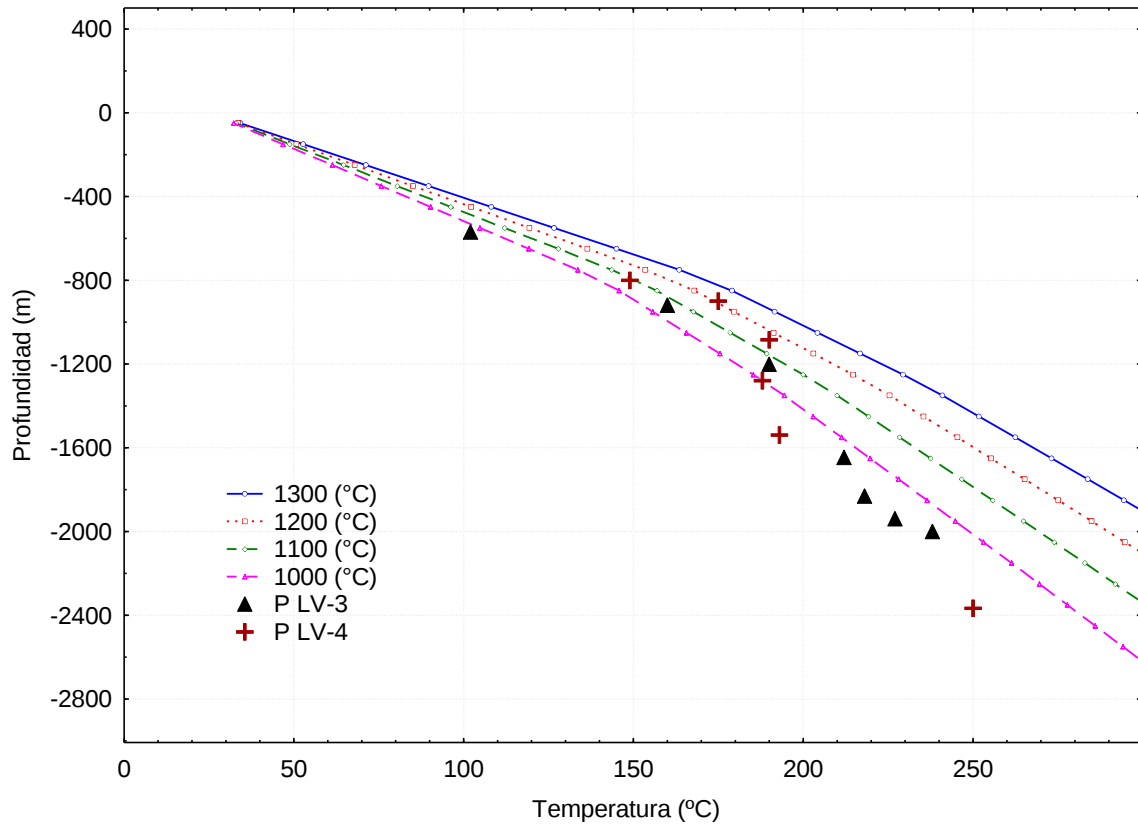


Figura 42. Comparación entre las temperaturas simuladas con las registradas en los Pozos LV-3 y LV-4 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes.

Tabla 14. Comparación entre las temperaturas simuladas (temperatura de emplazamiento de la cámara magmática de 1300, 1200, 1100 y 1000°C) y las temperaturas registradas en el pozo LV-3 a diferentes profundidades. ΔT es el error de ajuste (°C).

Pozo VL-3		Temperaturas simuladas (°C)							
Prof. (m)	T(Obs) (°C)	T(1300)	ΔT	T(1200)	ΔT	T(1100)	ΔT	T(1000)	ΔT
570	102	130	-28	123	-21	115	-13	107	-5
920	160	188	-28	176	-16	164	-4	153	7
1202	190	223	-33	209	-19	194	-4	180	-10
1647	217	273	-56	255	-38	237	-20	219	-2
1830	218	292	-74	274	-56	254	-36	235	-17
1940	227	304	-77	248	-21	264	-37	244	-17
2000	238	311	-73	290	-52	268	-30	248	-10

Tabla 15. Comparación entre las temperaturas simuladas (temperatura de emplazamiento de la cámara magmática de 1300, 1200, 1100 y 1000°C) y las temperaturas registradas en el pozo LV-4 a diferentes profundidades. ΔT es el error de ajuste (°C).

Pozo LV-4		Temperaturas simuladas (°C)							
Prof. (m)	T(Obs)	T(1300)	ΔT	T(1200)	ΔT	T(1100)	ΔT	T(1000)	ΔT
800	149	171	-22	160	-11	146	2	140	9
900	175	185	-10	174	1	162	13	150	25
1085	190	208	-18	196	-6	182	8	168	22
1280	188	234	-46	218	-30	203	-15	186	2
1540	193	264	-71	244	-51	224	-31	211	-18
2367	250	350	-100	324	-74	302	-52	276	-26

3.2.2. Modelado térmico en la caldera La Reforma

Se realizaron 5 modelos térmicos variando la profundidad de la cima de la cámara magmática a 4, 5, 6, 7 y 8 km con un espesor constante de la cámara de 4 km, para inferir el posible comportamiento térmico bajo la caldera La Reforma. Estos modelos son una aproximación del posible estado térmico bajo esta estructura, tomando en cuenta que existe una limitada información acerca de la geología y no hay reporte alguno de datos de temperatura o flujos de calor en la zona que podrían ayudar a validar los modelos, sin embargo, como se vio anteriormente, el modelo numérico se validó con la información disponible de los registros de temperatura de dos pozos del campo geotérmicos de Las Tres Vírgenes.

En los 5 modelos, la temperatura inicial del emplazamiento de la cámara magmática para un tiempo $t=0$ es de 1100°C (temperatura promedio entre 1000 y 1200°C, y que tiene una buena correlación como lo indican los valores de ΔT como se muestra en las Tablas 14 y 15), el tiempo total de simulación fue de 1 Ma (edad promedio de la caldera La Reforma) y se consideró pasos de tiempo de 100 años, lo que el programa resuelve la transferencia de calor en 10,000 iteraciones (considerando un criterio de convergencia o error de 1×10^{-8}). En la Figura 43 se muestran que para un tiempo $t=1$ Ma, el rango de temperaturas de 300 a 450°C considerada en la hipótesis propuesta de la zona de Transición Frágil-Dúctil (TFD), se localiza para el modelo 1 entre 3.9 y 7.5 km de profundidad, para el modelo 2 entre 3.9 y 7.4 km de profundidad, para el modelo 3 entre 4.1 y 7.5 km de profundidad, para el modelo 4 entre 4.4 y 7.7 km de profundidad, y para el modelo 5 entre 4.8 y 8.0 m de profundidad.

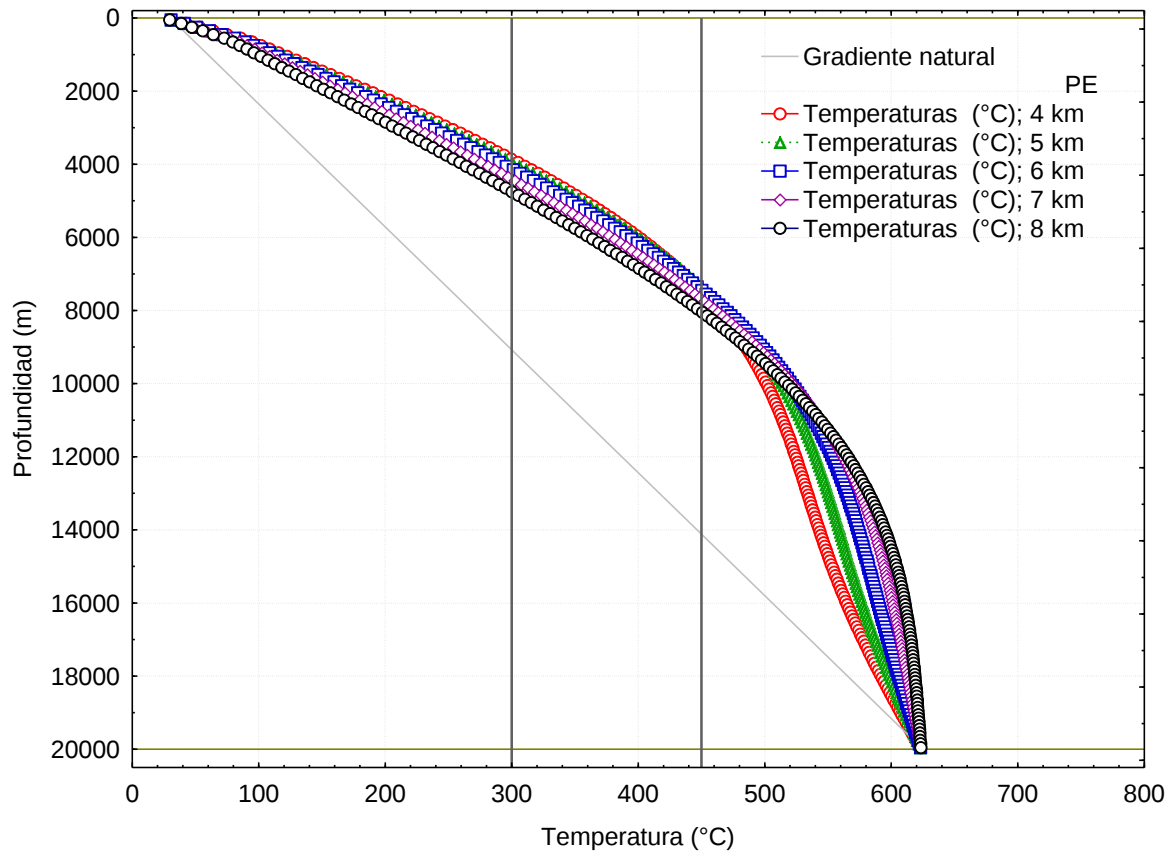


Figura 43. Comportamiento térmico de los 5 modelos propuestos para un tiempo de simulación de 1Ma (posible comportamiento térmico actual). Los círculos en color rojo corresponden al modelo con la cima de la cámara magmática (CCM) ubicada a 4 km de profundidad; los triángulos en color verde corresponden al modelo con la CCM a 5 km de profundidad; los cuadros en color azul corresponden al modelo con la CCM a 6 km de profundidad; los rombos en color morado corresponden al modelo con la CCM a 7 km de profundidad; y los círculos en color negro corresponden al modelo con la CCM a 8 km de profundidad.

Por tanto, con base al análisis de la distribución de la sismicidad donde se observa que entre los 7-8 km de profundidad comienza a disminuir la ocurrencia de eventos bajo la caldera La Reforma y las estructuras de los alrededores (caldera El Aguaito y Las Tres Vírgenes; ver Figuras 39 y 40), se sugiere que el modelo que mejor representa el rango de temperaturas de 300 a 450°C considerado en la hipótesis de la zona de TFD, corresponde al modelo 5 (cima de la cámara magmática a 8 km de profundidad con un espesor de 4 km) que indica que este rango de temperaturas se encuentra entre 4.8 y 8.0 km de profundidad (Figura 49). Antayhua-vera *et al.* (2015) y Wong (2000) sugieren que en Las Tres Vírgenes este límite se encuentra alrededor de los 7-8 km de profundidad, lo que podría utilizarse como un indicador de frontera de una zona de mayor temperatura debido a que el nivel de la sismicidad disminuye conforme aumenta la temperatura a estas profundidades.

Capítulo 4. Conclusiones y Recomendaciones

- En la primera campaña (septiembre-octubre de 2015), con 5 estaciones instaladas y cubriendo el ~30% del área superficial en la caldera La Reforma se registraron 13 eventos sísmicos con magnitudes (M_c) entre 0.8 y 2.4 y profundidades entre 1 y 12 km. Los errores de localización epicentral u horizontal son menores a ± 2 km para 3 eventos ubicados dentro de la red. Para los eventos ocurridos fuera de la red (10 eventos) los errores de localización se incrementaron hasta ± 4 km. En la segunda campaña (abril-mayo de 2016), con 10 estaciones instaladas y cubriendo totalmente la caldera La Reforma se registraron 25 eventos sísmicos con magnitudes (M_c) entre 0.8 y 2.9, y profundidades entre 1 y 7 km. El 80% de estos eventos tuvieron errores de localización horizontal de ± 2 km y el 96% incertidumbres de localización en profundidad de ± 2 km.
- A partir de las dos campañas de instrumentación sísmica realizadas en la caldera La Reforma, se obtuvo un catálogo de 38 microsismos ocurridos en la caldera con magnitudes entre 0.8 y 2.9 M_c , y profundidades de 1 a 12 km. Los errores estimados de localización horizontal son de ± 2 km que corresponden al 66% de los eventos del catálogo y el 34% restante corresponde a errores de localización horizontal mayores a ± 2 km. Se observó que los mayores errores de localización son de eventos ocurridos en el lado este de la caldera al igual que en la primera campaña, esto indica un posible contraste en la estructura de la caldera a ambos lados de la misma y por ello el modelo de velocidad usado tenga un comportamiento más consistente en el lado oeste de la caldera (con dirección hacia las Tres Vírgenes) donde las localizaciones en profundidad tienen menor error. Respecto a este aspecto, se recomienda elaborar un modelo de velocidad propio de la caldera La Reforma que proporcione información sobre este posible contraste y, por lo tanto, permita una mejor comprensión del comportamiento estructural de la caldera y sirva para futuros estudios sismológicos.
- En la comparación del comportamiento de la sismicidad de la caldera La Reforma respecto a la caldera El Aguajito y el volcán La Virgen, en general, se observó que la ocurrencia de sismicidad en la caldera La Reforma es menor respecto al Aguajito y el volcán La Virgen para el mismo tiempo de observación de un mes. La sismicidad que se presenta en caldera El Aguajito tiende a concentrarse a una profundidad entre 4 y 8 km, y en el volcán La Virgen los eventos se concentran entre 1 y 5 km, esta tendencia no se observa en la caldera La Reforma donde el comportamiento de la sismicidad es dispersa, contrario a lo que sucede, por ejemplo, en El Aguajito. Por otro lado, con base a lo observado en la distribución en profundidad del conjunto de los microsismos de la

caldera La Reforma, se sugiere la presencia de un posible límite a 7-8 km de profundidad a partir del cual disminuye la ocurrencia de eventos bajo la caldera.

- Se obtuvieron 20 mecanismos focales de 20 microsismos: con 4 soluciones de falla normal y 6 normales con componente lateral, 4 inversos y 6 inversos con componente lateral. Estas variaciones en el fallamiento pueden estar reflejando la heterogeneidad del lugar (procesos de acortamiento y extensión). Se sugiere que estos eventos pueden estar asociados a pequeñas fallas o fracturas que posiblemente no han sido identificadas hasta el momento, por lo que esta información es valiosa para futuros trabajos geológicos y geofísicos de esta caldera.
- Se realizó el análisis de señales de los eventos registrados en la caldera La Reforma encontrando que el ancho de banda en frecuencias queda definido de 4 Hz a 17 Hz y la mayor cantidad de amplitudes máximas o frecuencias dominantes, está entre 6 y 15 Hz. Respecto al dominio del tiempo, las señales tienen similitud con eventos tipo vulcano-tectónicos (VT), sin embargo, dado que no hay evidencia de que estos eventos estén relacionados con algún tipo de fracturamiento del medio debido al transporte de fluidos geotérmicos, se sugiere que la génesis de estos eventos puede obedecer a la propia actividad de la tectónica de la caldera.
- El posible límite que se observa a los 7-8 km de profundidad a partir del cual comienza a disminuir la sismicidad en la caldera La Reforma, podría estar relacionado con la frontera de una posible zona de alta temperatura o zona de Transición Frágil-Dúctil (TFD) de la corteza, en donde inicia el final de los procesos cataclásticos a un rango de temperaturas entre 300 y 450°C. En este sentido, de acuerdo al modelado térmico que se realizó bajo la caldera, se observó que este rango de temperaturas se encuentra entre 4.8 y 8.0 km de profundidad, lo que puede indicar la relación del comportamiento entre la disminución de la sismicidad en profundidad con la presencia de una posible zona de mayor temperatura o zona de Transición Frágil-Dúctil (TFD).
- Este trabajo es un precedente (en etapa experimental) en el estudio de esta zona desde el punto de vista sismológico y de exploración geotérmica, y es importante que la información proporcionada en esta investigación pueda complementarse con otros estudios tanto térmicos como geofísicos que deben proponerse a futuro en la caldera La Reforma, con el fin de delimitar con mayor detalle un posible escenario con potencial geoenergético.

Literatura citada

- Acosta, J., Rodríguez, M., Álvarez, S., Arellano, G. (2000). Arreglo sísmico de pequeña apertura en Tres Vírgenes, B.C.S. CICESE-CFE, 20.
- Acocella, V., Cifelli, F., Funiciello, R. (2000). Analogue models of collapse calderas and resurgent domes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 104, 81-96.
- Antayhua-Vera, Y., Lermo-Samaniego, J., Vargas, C. (2008). Estudio sismológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte II: Tomografía sísmica por atenuación a partir de ondas de coda ($Q_c - 1$) de sismos locales. *Geotermia*, 21(2), 29-41.
- Antayhua-Vera, Y., Lermo-Samaniego, J., Quintanar-Robles, L., Campos-Enríquez, O. (2015). Seismic activity and stress tensor inversion at Las Tres Vírgenes Volcanic and Geothermal Field (México). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 305, 19-29.
- Bertani, R. (2016). Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. *Geothermics*, 60, 31-43.
- Best, M. G. (2013). *Igneous and metamorphic petrology*. Second edition, Blackwell Publishing, 758.
- Bormann P., Wendt, S. (2012). Determination of fault plane solutions. In: P. Bormann (Ed). *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, IASPEI, GFZ, Potsdam, 17.
- Bufo, E., Pro, C. (2006). Mecanismo focal y sismotectónica: aportación de Agustín Udías. *Física de la Tierra*. Vol. 18, Universidad Complutense, Madrid, 12.
- Cenegel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Editorial McGrawHill, tercera edición. México, 932.
- Cronin, V. (2010). A primer on focal mechanism solutions for geologists. *Science Education Resource Center, Carleton College*, 14.
- Cole, J.W., Milner, D.M., Spinks, K.D. (2005). Calderas and caldera structures: a review. *Earth-Science Reviews*, 69, 1-26.
- DeNosaquo, K. R., Smith, R.B., Lowry, A. R. (2009). Density and lithospheric strength models of the Yellowstone-Snake river plain volcanic system from gravity and heat flow data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 188, 108-127.
- Dmochowski, J. E. (2005). Application of MODIS-ASTER (Master) simulator data to geological mapping of young volcanic regions in Baja California, Mexico (Doctoral dissertation, California Institute of Technology), 256.
- Dragoni, M. (1993). The brittle-ductile transition in tectonic boundary zones. *Annali Di Geofisica*, 36(2), 37-44.
- Eppelbaum, L., Kutasov, I., Pilchin, A. (2014). *Applied Geothermics*. Editorial Springer, lecture notes in Earth System Sciences. Berlin, 757.
- Fabriol, H., Munguía L. (1997). 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, 1807-1810.
- Fletcher, J. M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., Gehrels, G. E. (2007). Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas. *Geological Society of America Bulletin*, 119(11-12), 1313-1336.

- Francis, P. (1993). *Volcanoes, a planetary perspective*. Oxford University Press, New York, USA, 443.
- Frez, J., González, J. J., Acosta, J. G., Nava, F. A., Méndez, I., Carlos, J., García-Arthur, R. E., Álvarez, M. (2000). A Detailed microseismicity study and current stress regime in the peninsular ranges of northern Baja California, Mexico: The ojos Negros Region. *Bull. Seism. Am.* 90 (5), 1133-1142.
- Foulger, G. R., Julian, B. R., Hill, D. P., Pitt, A. M., Malin, P. E., Shalev, E. (2004). Non-Double-Couple Microearthquakes At Long Valley Caldera, California, Provide Evidence For Hydraulic Fracturing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 132, 45-71.
- Garduño-Monroy, V. H., Vargas-Ledezma, H., Campos-Enriquez, J. O. (1993). Preliminary geologic studies of Sierra El Aguajito (Baja California, Mexico): a resurgent-type caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59(1), 47-58.
- Guerrero-Martinez, F. J., Verma, S. P. (2013). Three dimensional temperature simulation from cooling of two magma chambers in the Las Tres Vírgenes geothermal field, Baja California Sur, Mexico. *Energy*, Vol. 53, 110-118.
- Guzman-Speziale, M. (2001). Active seismic deformation in the grabens of northern Central America and its relationship to the relative motion of the North America-Caribbean plate boundary. *Tectonophysics*. Vol. 337, 39-51.
- Georgsson, L. (2009). Geophysical methods used in geothermal exploration. Presented at Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya, 16.
- Gutiérrez-Negrín, L., Quijano-León, J. (2005). Update of Geothermics in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress*, 24-29.
- Havskov, J., Ottemoller, L. (1999). SeisAn earthquake analysis software. *Seismological Research Letters*, 70(5), 532-534.
- Havskov, J., Ottemöeller, L. (2010). *Routine data processing in Earthquake seismology*. Springer, University of Bergen, Bergen, 347.
- Helffrich, G., Brodholt, J. (1991). Relation of Deep seismicity to the thermal structure of subducted lithosphere. *Nature*, Vol. 353, 252-255.
- Hill, D. P. (2005). *Unrest in Long Valley caldera, California. 1978-2004*. USGS, 24.
- Ibáñez, J.M., Carmona, E. (2000). *Sismicidad Volcánica*. Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada. 14.
- Inza-Callupe, L. A. (2014). Understanding magmatic processes and seismo-volcano source localization with multicomponent seismic arrays. *Earth Sciences. Université de Grenoble*, 193.
- Jiménez-Méndez, N. (2015). *Sismicidad inducida asociada a la estimulación del pozo LV-6 del campo geotérmico Tres Vírgenes*. Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, 1-83.
- Kissling, W., Ellis, S., Charpentier, F., Bibby, H. (2010). Large scale convective flows with a brittle-ductile transition. *Proceedings World Geothermal Congress*, 7.
- Kukkonen, II., Lindberg, A. (1998). Thermal properties of rocks at the investigation sites: measured and calculated thermal conductivity, specific heat capacity and thermal diffusivity. *Geological Survey of Finland, Report 89-09e*, 32.
- Lermo-Samaniego, J., Antayhua-Vera, Y., Quintanar-Robles, L., Lorenzo-Pulido, C. (2008). Estudio sismológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I : Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos. *Geotermia*, 21(1), 25-41.

- Lienert, B., Havskov, J. (1995). A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seismological Research Letters*. 66(5), 26-36.
- López, H.A., Casarrubias, Z.U., Leal, H.R. (1993). Estudio geológico de Tres Vírgenes, B.C.S. Informe interno OGL/BC/002/93, Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Subgerencia de Estudios, Departamento de Exploración, 100.
- López, A., García, G., Arellano, G. (1994). Geological and geophysical studies at Las Tres Vírgenes, B.C.S., Mexico, geothermal zone. *Geotherm. Res. Counc. Trans.* 18, 275-280.
- Lorenzo-Pulido, C., Soto-Peredo, J. (2013). Sismicidad en el complejo volcánico de Las Tres Vírgenes, B.C.S. *Geotermia*, 26(1), 34-43.
- Macías-Carrasco, M. (1997). Análisis de la información sísmica del campo geotérmico de Tres Vírgenes, B.C.S. Período Enero-Abril de 1994. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingenierías, 67.
- Macías-Vázquez, J., Jiménez-Salgado, E. (2012). Actualización vulcanológica del complejo de Las Tres Vírgenes, BCS. *Geotermia*, 26(1), 26-28.
- Macías-Vázquez, J., Jiménez-Salgado, E. (2013). Estudio de estratigrafía y geología del complejo volcánico Tres Vírgenes, BCS. *Geotermia*, 26(1), 14-23.
- Majer, E. L., McEvilly, T. V., Albores, A., Diaz, C. S. (1980). Seismological studies at Cerro Prieto. *Geothermics*, 9(1-2), 79-88.
- Martín-Barajas, A. (2000). Volcanismo y extensión en la provincia extensional del Golfo de California. *Boletín de la sociedad geológica Mexicana*, Vol, 53, 72-83.
- Maya-González, R., Guitiérrez-Negrín, L. (2007). Recursos geotérmicos para generar electricidad en México. *Revista Digital Universitaria*, 8(12), 13.
- Munguía, L., Wong, V. (1993). Analisis e interpretación de la información sísmica digital registrada en el campo geotérmico de Tres Vírgenes, B.C.S, en el periodo de febrero-ayo de 1993. Reporte CICESE-CFE.
- Munguía, L., González, M., Mayer, S., & Aguirre, A. (2006). Seismicity and state of stress in the La Paz–Los Cabos region, Baja California Sur, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(2), 624-636.
- Nava, F. A., Acosta, J., Frez, J. (2009). Capacidad de localización de una red sismográfica. *Unión Geofísica Mexicana*, 29(2), 234-239.
- Ortiz-Prieto, I., Lorenzo-Pulido, C. (2009). Quince años de monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS. *Geotermia*, 22(2), 28-34.
- Ottensmöller, L., Voss, P., & Havskov, J. (2015). Seisan earthquake analysis software, 433.
- Pickering-White, B. J., Smith R. B., Husen S., Farrell, J. M., Wong, I. (2009). Seismicity and earthquake hazard analysis of the Teton–Yellowstone region, Wyoming. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 188, 277-296.
- Pluijm, S., Marshak, S. (2004). *Earth structure, an introduction to structural geology and tectonics*. Second edition, Norton and Company, New York, 641.
- Reyes, C. A. (1979). Estudio de microsismicidad del sistema de fallas transformadas imperial-cerro prieto. CICESE, 90.

- Reasenber, P., Öppenheimer, D. (1985). FPFIT, FPLOT, and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault plane solutions. Technical report. U.S. Geol. Survey. 28.
- Robertson, E. C. (1988). Thermal proprieties of rocks. USGS, Report 88-441, 110.
- Romo-Jones, J., Wong-Ortega, V., Vázquez-González, R., Flores-Luna, C. (2000). Conductividad eléctrica y atenuación de ondas de coda en el campo geotérmico Las Tres Vírgenes en Baja California Sur. *Unión Geofísica Mexicana*, 20(1), 21-29.
- Romo-Jones, J., Grupo de CeMIE-Geo (2015). The Mexican Center for Innovation in Geothermal Energy (CeMIE-Geo). Proceedings World Geothermal Congress, 7.
- Schmitt, A. K., Stockli, D. F., Hausback, B. P. (2006). Eruption and magma crystallization ages of Las Tres Vírgenes (Baja California) constrained by combined $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ and $(\text{U}-\text{Th})/\text{He}$ dating of zircon. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(3-4), 281-295.
- ScholZ, C. H. (1988): The brittle-plastic transition and the depth of seismic faulting. *Geologische Rundschau*, 77(1), 319-328.
- Schmitt, A. K., Stockli, D. F., Niedermann, S., Lovera, O. M., Hausback, B. P. (2010). Eruption ages of Las Tres Virgenes volcano (Baja California): A tale of two helium isotopes. *Quaternary Geochronology*, 5(5), 503–511.
- ScholZ, C. H. (1988): The brittle-plastic transition and the depth of seismic faulting. *Geologische Rundschau*, 77(1), 319-328.
- Simiyu, S. M. (2009). Application of micro-seismic methods to geothermal exploration: examples from the Kenya Rift. Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, Organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, 27.
- Suzuki, Y., Ioka, S., Muraoka, H. (2014). Determining the maximum depth of hydrothermal circulation using geothermal mapping and seismicity to delineate the depth to brittle-plastic transition in northern Honshu, Japan. *Energies*, Vol. 7, 3503-3511.
- Tanaka, A. (2004). Geothermal gradient and heat flow data in and around Japan (II): Crustal thermal structure and its relationship to seismogenic layer. *Earth Planets Space*, 56, 1195-1199.
- Tello-Hinojosa, E., Verma, M. P., & Gonzáles-Partida, E. (2005). Geochemical Characteristics of Reservoir Fluids in the Las Tres Virgenes , BCS , Mexico. Proceedings World Geothermal Congress, (April), 24–29.
- Tello-López, M. R., Torres-Rodríguez, M. A. (2015). Behavior of the Production Characteristics of the Wells in the Las Tres Virgenes, B.C.S., Geothermal Field, México. Proceedings World Geothermal Congress, (April), 19-25.
- USGS. (2016). <https://earthquake.usgs.gov/learn/topics/beachball.php>
- Urbán-Rascón, E. (2010). Relación de la actividad sísmica local, pozos inyectoros y fallas activas, en los campos geotérmicos de México. Tesis de Licenciatura, UNAM, 117.
- Urbán-Rascón, E., Lermo-Samaniego, J. (2012). Relationship of Local Seismic Activity, Injection Wells and Active Faults in the Geothermal Fields of Mexico. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, 11.
- Vargas-Ledezma, H., Garduño-Monroy. (1988). Estudio geológico-geotermico de la caldera el Aguajito. CFE, 40.

- Verma, S. P., Pandarinath, K., Santoyo, E., González-Partida, E., Torres-Alvarado, I. S., Tello-Hinojosa, E. (2006). Fluid chemistry and temperatures prior to exploitation at the Las Tres Vírgenes geothermal field, Mexico. *Geothermics*, 35(2), 156-180.
- Verma, S. P., Gómez-Arias, E. (2014). Optimal discretization time and mesh size in three-dimensional temperature field simulation in two Mexican geothermal fields. *Geothermics*, Vol. 51, 91-102.
- Verma, S. P., Gómez-Arias, E. (2016). Flat surface versus present-day topography for cylindrical and spherical sources in temperature field simulations models: The Cerritos Colorados geothermal field, Jalisco, Mexico. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 107, 70-78.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method*, Longman Scientific & Technical, New York, USA.
- Viggiano-Guerra, J.C., Sandoval-Medina, F., Flores-Armenta, M.C., Pérez, R.J., González-Partida, E. (2009). Aplicación del SPCALC en la especiación química y termodinámica de fluidos: ejemplo del caso de los pozos LV-4A, LV-11 y LV-13, del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS. *Geotermia*, 22(1), 12-27.
- Violay, M., Gibertm B., Mainprice, D., Evans, B., Pezard., P. A., Flovenz, O. G., Asmundsson, R. (2010). The brittle-ductil transition in experimentally deformed basalt under oceanic crust conditions: Evidence for presence of permeable reservoirs at supercritical temperatures and pressure in the icelandic crust. *Proceedings World Geothermal Congress*, 6.
- Wassermann, J. (2012). *Volcano Seismology*. In: P. Bormann (Ed). *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, IASPEI, GFZ, Potsdam, 77.
- Waite, G. P., Smith, R. B. (2002). Seismic evidence for fluid migration accompanying subsidence of the Yellowstone caldera. *Journal of Geophysical Research*, 107, 15.
- Wong, V. (2000). Estudio de sismotectónica, atenuación y tomografía sísmica en la región volcánica y geotérmica Las Tres Vírgenes. Tesis doctoral, CICESE, 1-184.
- Wong, V., Rebollar, C. J., Munguía, L. (2001). Attenuation of coda waves at the Tres Vírgenes volcanic area, Baja California Sur, México. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(4), 683-693.
- Wong, V., Munguía, L. (2006). Seismicity, focal mechanisms, and stress distribution in the Tres Vírgenes volcanic and geothermal region, Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional*, 45(1), 23-37.
- Zobin, V. M. (2012). *Introduction to Volcanic Seismology*. Second edition. Elsevier, USA. 491.

Anexos

Anexo 1. Compilación de eventos empleados para la comparación de la sismicidad entre Las Tres Vírgenes y la caldera La Reforma. Los catálogos consultados para Las Tres Vírgenes son los reportados por Macías-Carrasco (1997; eventos del año 1994). Wong (2000; eventos de año 1993) y Jiménez-Méndez (2015; eventos del año 2010).

Fecha	Hora (UTC)	Lat (N)	Long (W)	Prof (km)	Mc
1-nov-1993	13:10	27.495	-112.586	8.0	3.2
2-nov-1993	2:23	27.483	-112.590	4.5	1.9
2-nov-1993	3:49	27.479	-112.559	1.2	1.2
2-nov-1993	20:37	27.463	-112.599	7.3	1.4
3-nov-1993	3:33	27.468	-112.597	1.0	1.7
3-nov-1993	8:28	27.478	-112.596	6.8	2.6
3-nov-1993	8:30	27.465	-112.587	6.9	1.7
4-nov-1993	0:46	27.493	-112.516	2.3	1.4
4-nov-1993	2:02	27.540	-112.539	4.7	1.5
4-nov-1993	9:29	27.562	-112.510	5.0	2.0
4-nov-1993	12:01	27.551	-112.502	5.0	1.7
4-nov-1993	15:16	27.561	-112.507	5.0	2.2
4-nov-1993	15:16	27.557	-112.508	5.1	1.8
4-nov-1993	15:50	27.559	-112.514	5.2	1.6
5-nov-1993	7:53	27.564	-112.510	5.0	1.5
5-nov-1993	17:53	27.542	-112.533	7.1	1.7
5-nov-1993	17:57	27.561	-112.503	4.9	1.7
5-nov-1993	18:37	27.560	-112.505	4.9	1.8
5-nov-1993	20:01	27.550	-112.522	6.6	1.8
5-nov-1993	20:34	27.560	-112.518	5.5	1.9
6-nov-1993	1:08	27.556	-112.514	5.3	1.6
6-nov-1993	2:23	27.561	-112.507	5.0	1.7
6-nov-1993	2:35	27.562	-112.509	5.4	1.6
6-nov-1993	3:33	27.550	-112.521	6.2	1.7
6-nov-1993	21:41	27.547	-112.518	9.2	1.6
7-nov-1993	1:54	27.530	-112.500	3.2	2.5
7-nov-1993	1:59	27.507	-112.581	3.8	1.8
7-nov-1993	8:18	27.492	-112.545	5.9	1.8
7-nov-1993	8:18	27.492	-112.545	5.9	2.1
8-nov-1993	3:17	27.563	-112.510	5.1	2.1
8-nov-1993	3:19	27.554	-112.510	4.9	2.0
8-nov-1993	3:46	27.557	-112.506	5.0	1.9
8-nov-1993	7:42	27.554	-112.510	5.5	1.3
8-nov-1993	7:43	27.555	-112.503	5.2	1.6
8-nov-1993	7:45	27.541	-112.520	6.2	1.9
8-nov-1993	22:53	27.559	-112.502	5.3	2.1
9-nov-1993	1:02	27.557	-112.503	5.5	2.7

Anexo 1 (continuación).

Fecha	Hora	Lat	Long	Prof	Mc
	(UTC)	(N)	(W)	(km)	
9-nov-1993	8:11	27.557	-112.507	5.3	1.8
9-nov-1993	8:12	27.551	-112.498	5.1	1.8
9-nov-1993	8:14	27.553	-112.504	5.4	1.6
9-nov-1993	18:20	27.556	-112.511	6.8	1.8
9-nov-1993	22:39	27.556	-112.516	4.9	2.1
10-nov-1993	8:49	27.554	-112.526	4.6	1.7
10-nov-1993	9:20	27.548	-112.494	1.2	2.1
10-nov-1993	9:21	27.558	-112.501	5.2	2.6
10-nov-1993	9:53	27.558	-112.515	5.3	1.7
10-nov-1993	21:15	27.552	-112.516	4.8	1.8
11-nov-1993	10:17	27.553	-112.512	5.2	1.6
11-nov-1993	10:42	27.554	-112.507	5.3	2.1
11-nov-1993	11:31	27.555	-112.512	5.1	1.7
11-nov-1993	12:42	27.555	-112.513	5.5	1.4
11-nov-1993	13:07	27.529	-112.536	4.0	2.4
11-nov-1993	23:30	27.558	-112.514	5.1	1.6
12-nov-1993	13:52	27.552	-112.501	5.5	2.3
12-nov-1993	14:17	27.549	-112.515	6.4	2.6
12-nov-1993	14:38	27.528	-112.532	6.0	1.8
12-nov-1993	15:01	27.545	-112.511	6.9	2.0
12-nov-1993	22:11	27.551	-112.499	5.3	2.5
13-nov-1993	3:00	27.552	-112.521	4.7	1.6
13-nov-1993	22:26	27.564	-112.522	4.9	2.6
14-nov-1993	2:26	27.563	-112.510	5.0	1.5
14-nov-1993	2:43	27.563	-112.508	5.0	1.5
14-nov-1993	18:15	27.558	-112.502	5.0	1.5
14-nov-1993	23:21	27.538	-112.555	7.3	2.0
15-nov-1993	4:18	27.555	-112.524	4.9	2.4
15-nov-1993	4:20	27.558	-112.497	4.7	1.4
15-nov-1993	4:23	27.521	-112.555	5.8	1.7
15-nov-1993	4:46	27.553	-112.529	6.7	1.3
15-nov-1993	4:58	27.551	-112.514	6.2	1.7
15-nov-1993	5:01	27.528	-112.555	6.8	1.4
15-nov-1993	15:03	27.548	-112.517	6.0	2.2
15-nov-1993	21:10	27.561	-112.509	5.4	1.7
16-nov-1993	5:10	27.548	-112.512	4.7	1.7
16-nov-1993	5:15	27.548	-112.512	4.7	1.7
16-nov-1993	5:37	27.550	-112.527	7.0	1.7
16-nov-1993	23:39	27.545	-112.529	6.5	1.4
17-nov-1993	5:41	27.528	-112.566	4.5	1.9
17-nov-1993	5:46	27.558	-112.506	5.1	1.8

Anexo 1 (continuación).

Fecha	Hora	Lat	Long	Prof	Mc
	(UTC)	(N)	(W)	(km)	
17-nov-1993	5:55	27.528	-112.555	5.3	1.7
17-nov-1993	5:57	27.528	-112.546	5.1	2.3
17-nov-1993	13:08	27.557	-112.510	4.9	1.9
18-nov-1993	6:09	27.528	-112.555	4.8	2.0
18-nov-1993	6:24	27.542	-112.526	6.3	1.9
18-nov-1993	6:57	27.559	-112.506	4.4	1.5
18-nov-1993	7:26	27.528	-112.544	7.0	1.7
18-nov-1993	7:57	27.546	-112.542	6.2	1.5
18-nov-1993	7:58	27.528	-112.555	4.7	2.7
18-nov-1993	18:36	27.564	-112.510	5.0	1.9
19-nov-1993	8:38	27.555	-112.511	4.8	1.2
19-nov-1993	8:45	27.521	-112.551	5.7	1.3
19-nov-1993	19:09	27.507	-112.560	4.0	2.1
19-nov-1993	23:08	27.562	-112.511	5.2	1.0
20-nov-1993	1:39	27.521	-112.521	1.3	1.5
20-nov-1993	12:15	27.504	-112.559	4.0	1.4
20-nov-1993	12:46	27.510	-112.560	4.0	1.5
20-nov-1993	14:17	27.530	-112.536	8.0	1.4
20-nov-1993	15:18	27.523	-112.536	9.0	1.3
20-nov-1993	16:43	27.531	-112.539	6.1	2.4
20-nov-1993	23:45	27.555	-112.514	4.8	1.8
21-nov-1993	0:10	27.556	-112.518	5.5	1.4
21-nov-1993	1:23	27.528	-112.555	6.0	1.3
21-nov-1993	4:49	27.558	-112.527	5.5	1.6
21-nov-1993	6:04	27.564	-112.516	5.2	1.0
21-nov-1993	7:38	27.528	-112.555	5.0	1.5
21-nov-1993	12:53	27.562	-112.506	5.1	1.4
21-nov-1993	18:03	27.543	-112.527	6.0	1.5
21-nov-1993	18:08	27.558	-112.521	4.7	1.3
21-nov-1993	21:12	27.481	-112.565	1.0	1.3
22-nov-1993	3:18	27.558	-112.511	5.0	1.5
22-nov-1993	3:57	27.549	-112.533	4.7	2.4
22-nov-1993	4:00	27.558	-112.516	4.7	1.6
22-nov-1993	4:38	27.559	-112.518	4.6	1.4
22-nov-1993	5:06	27.557	-112.516	3.5	2.3
22-nov-1993	5:40	27.551	-112.523	4.9	1.5
22-nov-1993	4:41	27.547	-112.528	5.0	2.0
22-nov-1993	6:33	27.557	-112.517	3.7	1.5
22-nov-1993	9:30	27.555	-112.513	3.3	2.3
22-nov-1993	12:13	27.535	-112.577	5.1	1.3
22-nov-1993	20:33	27.550	-112.535	6.4	1.5

Anexo 1 (continuación).

Fecha	Hora	Lat	Long	Prof	Mc
	(UTC)	(N)	(W)	(km)	
23-nov-1993	6:41	27.511	-112.571	3.2	1.5
23-nov-1993	12:13	27.499	-112.548	3.0	1.8
23-nov-1993	12:46	27.502	-112.542	3.6	1.3
23-nov-1993	16:24	27.536	-112.543	1.9	2.0
23-nov-1993	20:51	27.462	-112.499	3.6	1.5
24-nov-1993	3:01	27.542	-112.547	5.6	1.6
24-nov-1993	3:17	27.546	-112.549	5.2	1.8
24-nov-1993	3:26	27.531	-112.545	5.2	2.0
24-nov-1993	3:27	27.548	-112.550	4.5	1.5
24-nov-1993	3:42	27.508	-112.566	3.7	1.8
24-nov-1993	23:56	27.565	-112.547	9.2	1.7
25-nov-1993	8:37	27.504	-112.584	4.6	1.5
25-nov-1993	8:39	27.503	-112.581	4.5	2.6
25-nov-1993	8:40	27.509	-112.584	5.2	1.6
25-nov-1993	13:35	27.557	-112.552	1.1	1.0
25-nov-1993	17:55	27.457	-112.607	3.7	1.6
26-nov-1993	6:38	27.480	-112.593	2.3	1.0
26-nov-1993	7:30	27.479	-112.594	4.1	1.5
26-nov-1993	13:51	27.528	-112.517	4.7	1.7
26-nov-1993	22:36	27.476	-112.597	4.5	1.7
27-nov-1993	12:42	27.550	-112.569	4.0	1.8
28-nov-1993	4:04	27.500	-112.582	4.0	2.2
28-nov-1993	13:13	27.543	-112.555	4.8	2.0
29-nov-1993	0:23	27.577	-112.533	9.4	1.8
29-nov-1993	7:11	27.544	-112.584	3.2	1.9
29-nov-1993	8:45	27.511	-112.585	1.0	2.0
29-nov-1993	23:09	27.537	-112.569	4.0	2.1
30-nov-1993	11:50	27.507	-112.583	6.7	2.0
30-nov-1993	18:45	27.495	-112.598	1.4	2.0
1-feb-1994	10:20	27.562	-112.549	6.6	1.9
16-feb-1994	0:10	27.558	-112.546	6.7	2.0
20-feb-1994	19:57	27.582	-112.536	0.2	1.9
21-feb-1994	23:10	27.471	-112.555	1.3	2.1
24-feb-1994	19:02	27.537	-112.569	4.9	1.9
1-mar-1994	23:08	27.537	-112.558	9.0	2.1
6-mar-1994	2:52	27.537	-112.569	4.0	2.6
16-mar-1994	23:14	27.537	-112.569	4.0	2.3
17-mar-1994	19:02	27.529	-112.514	6.5	2.1
17-mar-1994	8:39	27.495	-112.610	1.2	2.0
19-mar-1994	19:25	27.478	-112.585	4.0	2.3
21-mar-1994	9:33	27.513	-112.574	1.6	2.1

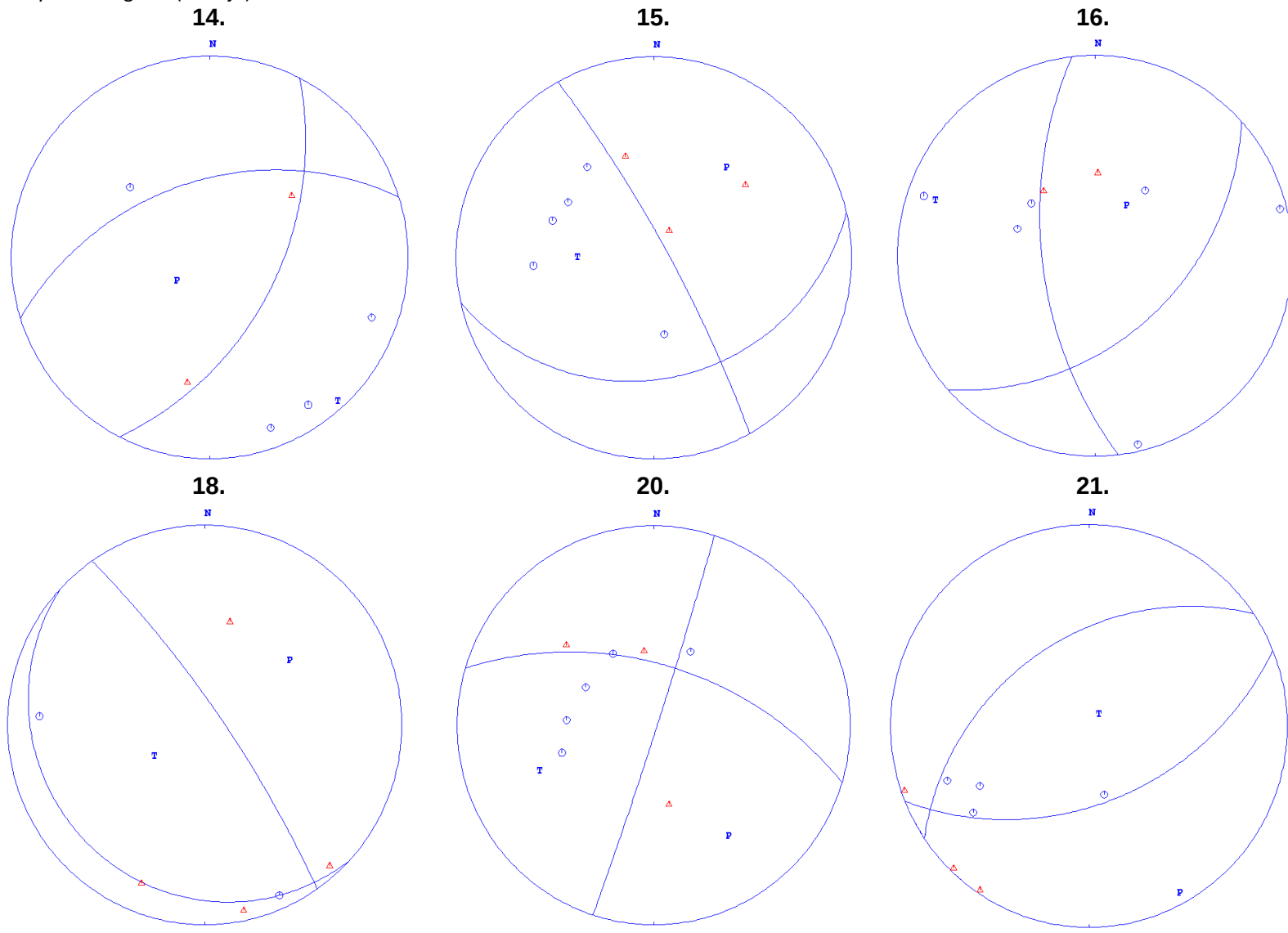
Anexo 1 (continuación).

Fecha	Hora	Lat	Long	Prof	Mc
	(UTC)	(N)	(W)	(km)	
23-mar-1994	21:39	27.469	-112.569	1.0	2.1
25-mar-1994	2:29	27.537	-112.569	4.0	2.5
27-mar-1994	1:19	27.576	-112.558	6.4	2.1
28-mar-1994	10:37	27.557	-112.532	5.8	2.0
29-mar-1994	8:02	27.502	-112.600	0.6	2.0
31-mar-1994	22:02	27.537	-112.546	4.3	2.1
2-abr-1994	10:19	27.487	-112.599	1.8	1.9
5-abr-1994	2:34	27.498	-112.596	1.1	1.9
7-abr-1994	0:28	27.513	-112.527	4.0	2.4
8-abr-1994	19:28	27.509	-112.546	1.1	1.8
9-abr-1994	17:59	27.513	-112.527	4.0	2.2
9-abr-1994	21:49	27.513	-112.527	4.0	2.3
11-abr-1994	0:28	27.513	-112.527	4.0	2.4
12-abr-1994	20:08	27.554	-112.531	7.9	1.9
13-abr-1994	21:49	27.513	-112.527	4.0	2.3
16-abr-1994	20:53	27.531	-112.511	7.4	2.1
17-abr-1994	15:08	27.463	-112.569	1.7	2.0
21-abr-1994	18:08	27.551	-112.553	8.7	1.9
22-abr-1994	23:39	27.501	-112.580	4.0	1.8
24-abr-1994	19:39	27.487	-112.569	2.0	2.2
5-abr-2010	7:17	27.487	-112.594	4.6	1.9
6-abr-2010	10:34	27.470	-112.633	6.6	1.6
6-abr-2010	13:15	27.468	-112.630	5.8	2.1
7-abr-2010	3:24	27.481	-112.596	5.0	1.1
8-abr-2010	22:57	27.498	-112.597	4.7	1.6
9-abr-2010	2:48	27.491	-112.592	4.1	1.8
9-abr-2010	6:24	27.491	-112.591	4.7	1.4
9-abr-2010	23:40	27.490	-112.592	4.4	1.2
10-abr-2010	12:41	27.491	-112.593	4.4	2.1
12-abr-2010	2:42	27.491	-112.592	4.1	2
12-abr-2010	20:44	27.493	-112.593	3.8	1.5
17-abr-2010	5:37	27.539	-112.508	6.8	0.8
18-abr-2010	2:58	27.504	-112.587	4.1	1.7
19-abr-2010	22:59	27.505	-112.586	4.2	1.5
19-abr-2010	3:00	27.498	-112.585	3.9	2.1
19-abr-2010	10:39	27.475	-112.632	6.7	2.4
20-abr-2010	9:28	27.540	-112.570	6.4	1.7
21-abr-2010	2:05	27.475	-112.626	6.4	1.6
22-abr-2010	8:05	27.491	-112.591	4.8	1.4
23-abr-2010	18:21	27.483	-112.596	4.5	1.7

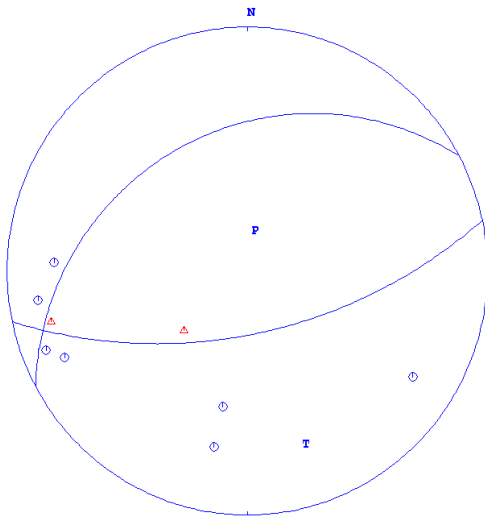
Anexo 1 (continuación).

Fecha	Hora	Lat	Long	Prof	Mc
	(UTC)	(N)	(W)	(km)	
23-abr-2010	18:22	27.491	-112.596	5.0	1.7
23-abr-2010	22:49	27.475	-112.592	3.8	1.9
24-abr-2010	2:17	27.481	-112.594	4.6	1.8
24-abr-2010	22:27	27.478	-112.595	4.1	1.5
24-abr-2010	22:40	27.479	-112.594	3.6	2.1
25-abr-2010	10:17	27.481	-112.594	4.3	1.9
26-abr-2010	0:29	27.489	-112.591	5.1	1.4
1-may-2010	21:32	27.496	-112.578	4.1	1
2-may-2010	10:17	27.481	-112.590	4.1	1.8
2-may-2010	10:18	27.479	-112.591	4.0	2.2
2-may-2010	21:36	27.478	-112.591	4.2	1.2
3-may-2010	18:36	27.477	-112.592	3.8	2.3
3-may-2010	18:37	27.480	-112.591	4.0	2.3
4-may-2010	1:55	27.477	-112.593	4.1	1.5
4-may-2010	15:53	27.496	-112.581	4.3	1.1
5-may-2010	6:06	27.477	-112.594	4.4	1.5
5-may-2010	7:36	27.479	-112.592	3.9	1.9
5-may-2010	23:19	27.482	-112.595	4.8	1.1
6-may-2010	2:50	27.467	-112.598	3.5	1.4
6-may-2010	23:13	27.482	-112.589	3.9	1.6
7-may-2010	4:44	27.495	-112.583	4.4	0.9
7-may-2010	12:40	27.480	-112.583	2.8	0.6
7-may-2010	18:11	27.484	-112.589	4.3	1.4
7-may-2010	22:32	27.486	-112.590	3.9	1.1
8-may-2010	2:43	27.483	-112.590	3.5	1.8
8-may-2010	22:46	27.482	-112.590	3.5	1.1
9-may-2010	8:12	27.482	-112.576	5.0	0.9
10-may-2010	3:15	27.513	-112.564	2.0	0.9
10-may-2010	15:16	27.511	-112.566	2.0	0.5
11-may-2010	9:03	27.488	-112.584	3.0	1.1
12-may-2010	0:13	27.492	-112.583	6.4	0.7
12-may-2010	9:16	27.491	-112.584	6.7	1.6

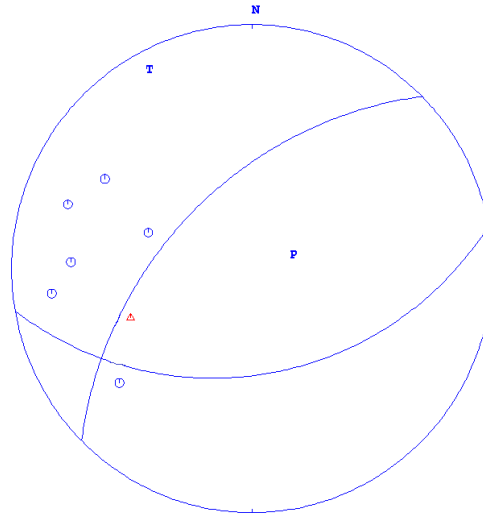
Anexo 2. Mecanismos focales de los eventos registrados en la caldera La Reforma relacionados con la Tabla 13 y Figura 35. Los círculos (en azul) corresponden a las compresiones y los triángulos (en rojo) a las dilataciones.



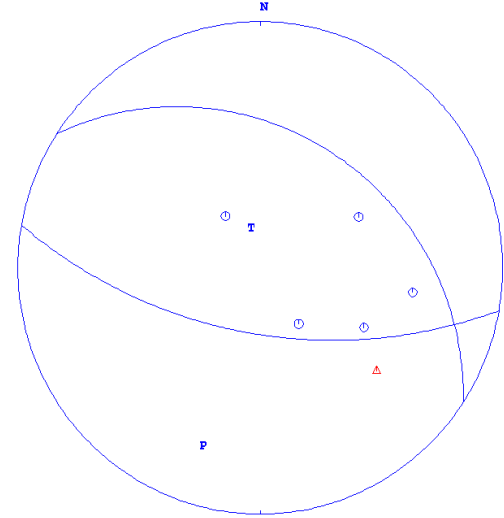
22.



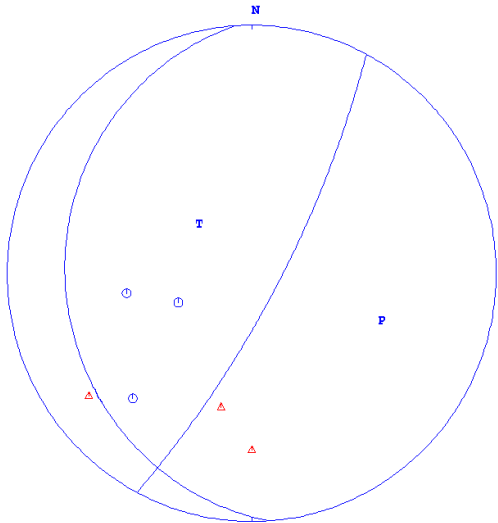
23.



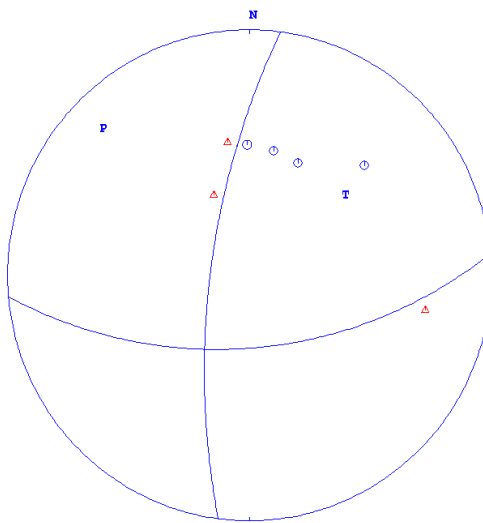
25.



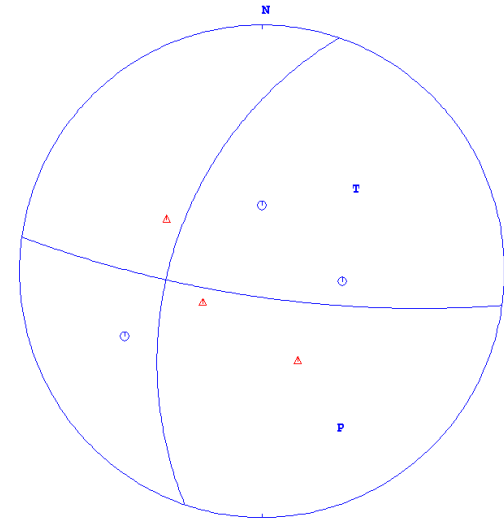
26.



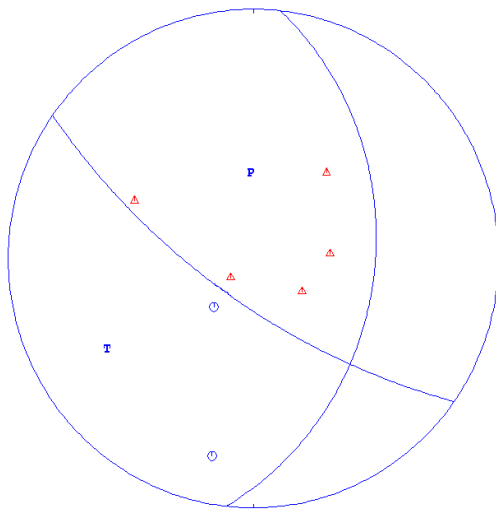
28.



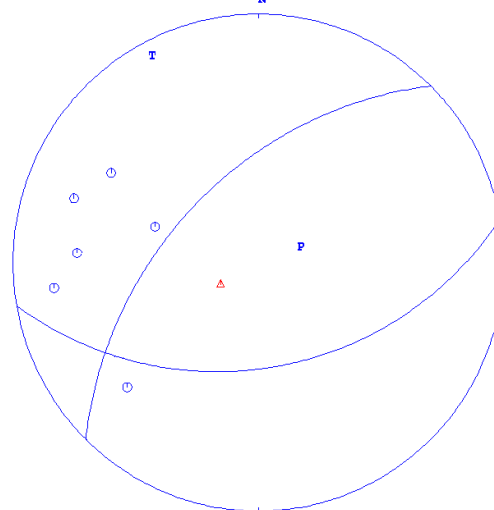
29.



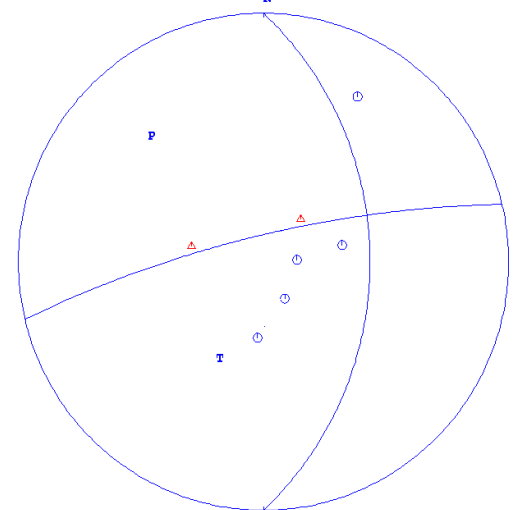
30.



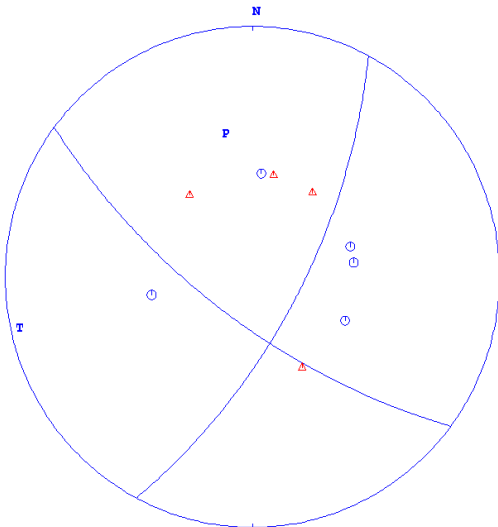
31.



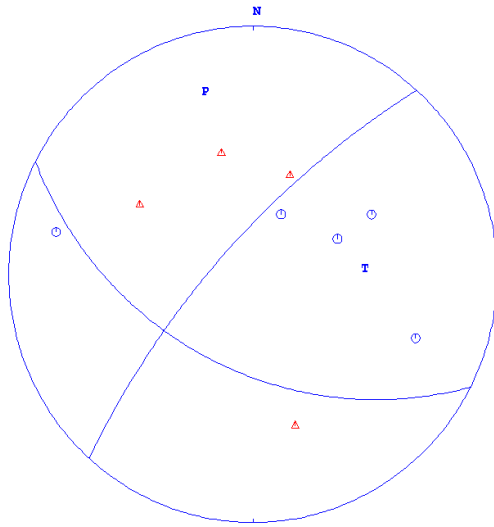
32.



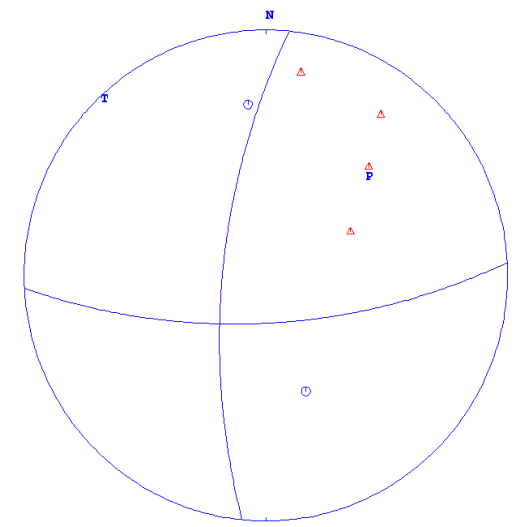
34.



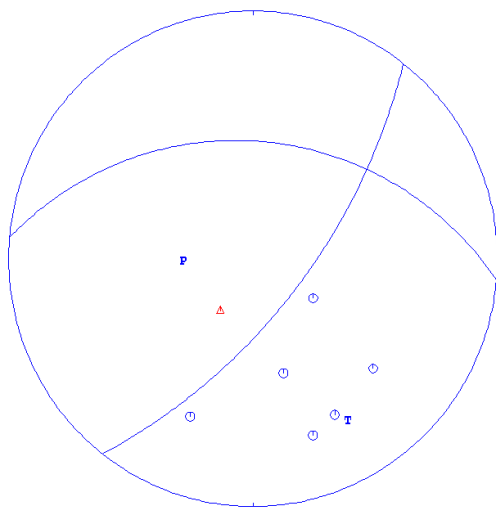
35.



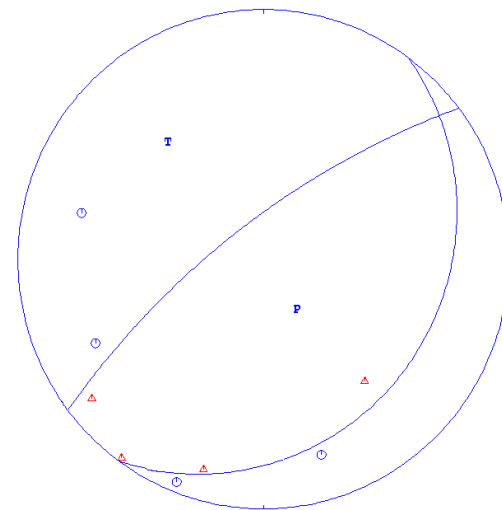
29.



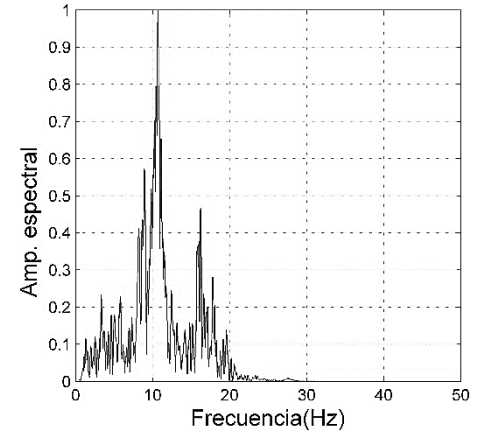
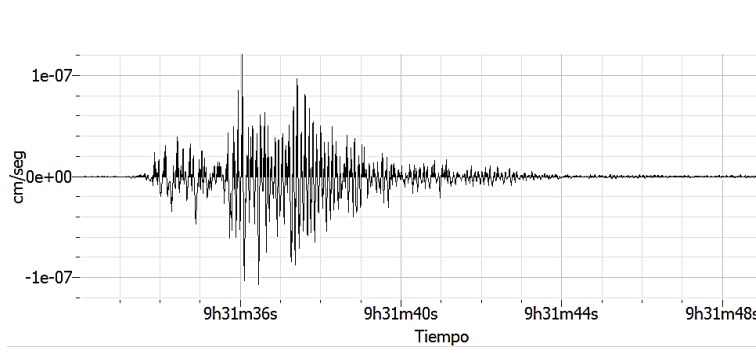
37.



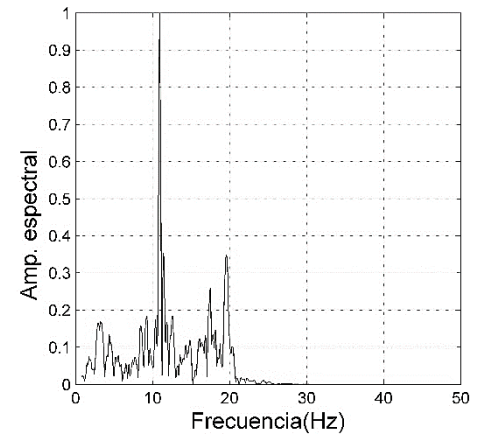
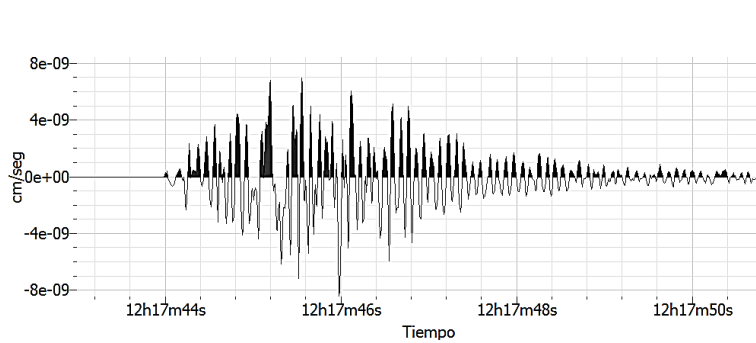
38.



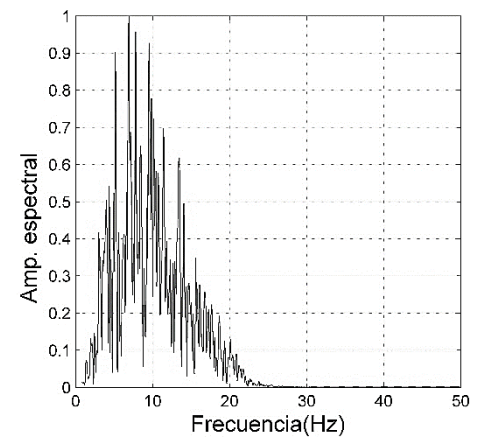
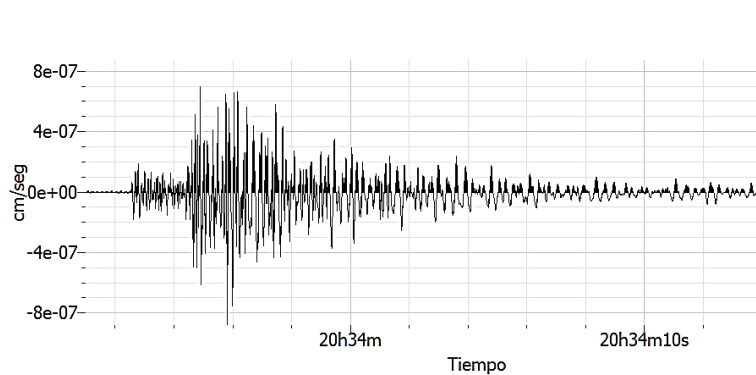
Anexo 3. Serie de tiempo y espectro de Fourier de los eventos registrados en la caldera La Reforma.



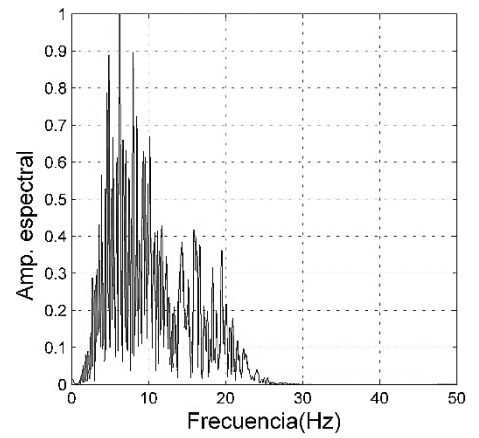
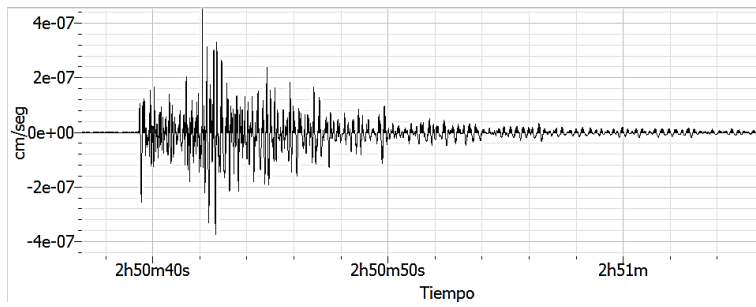
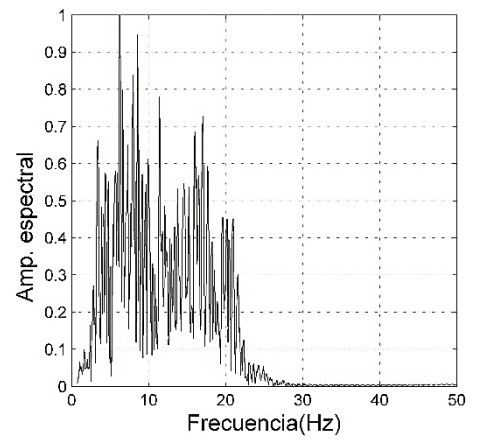
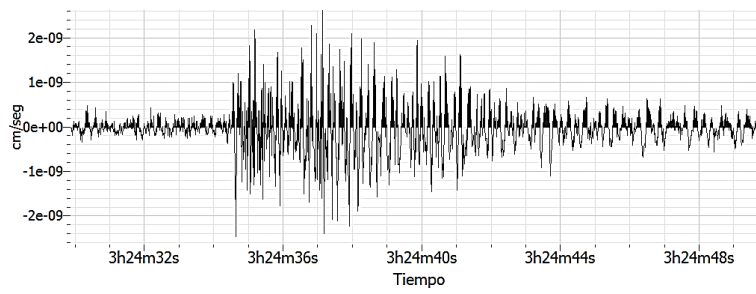
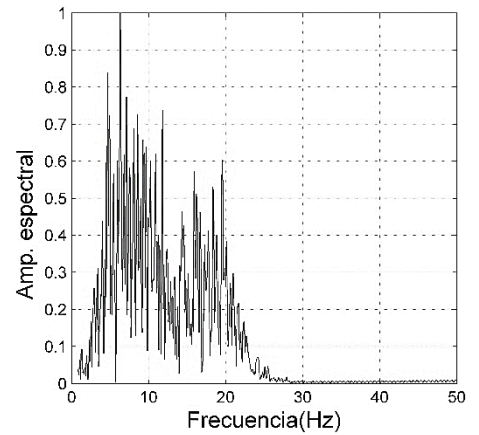
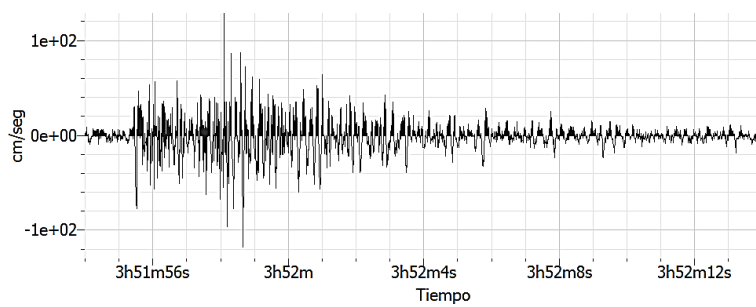
Evento 1.

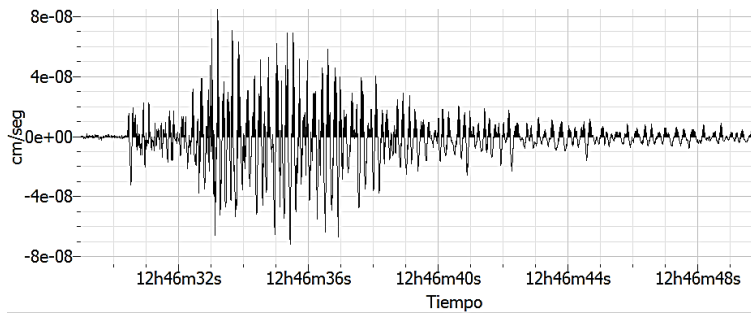
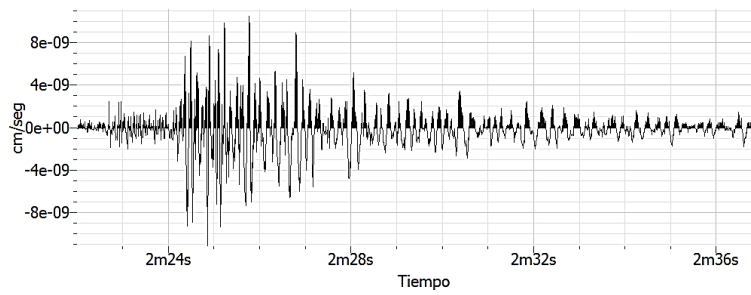
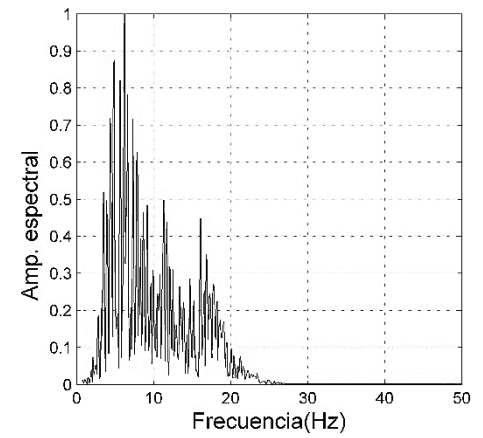
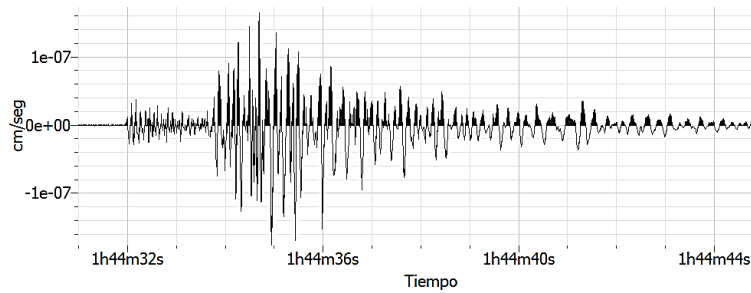
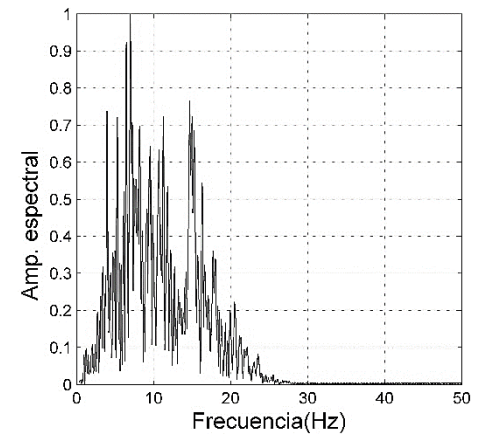
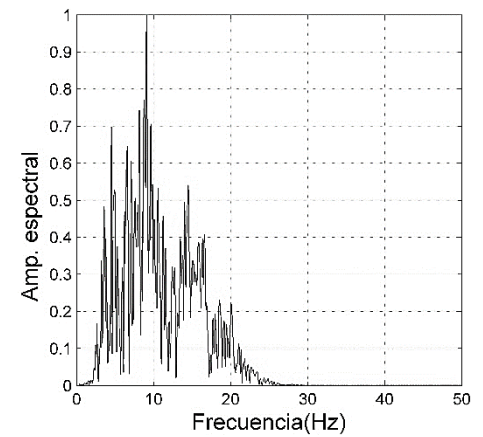


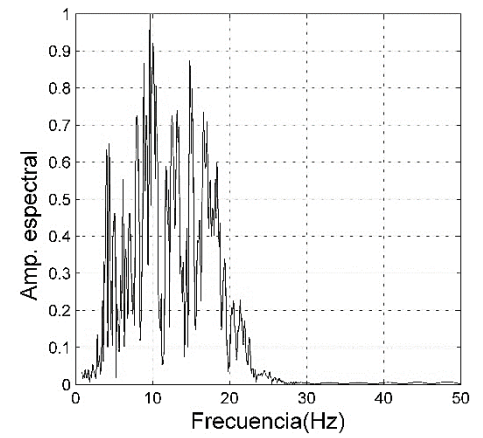
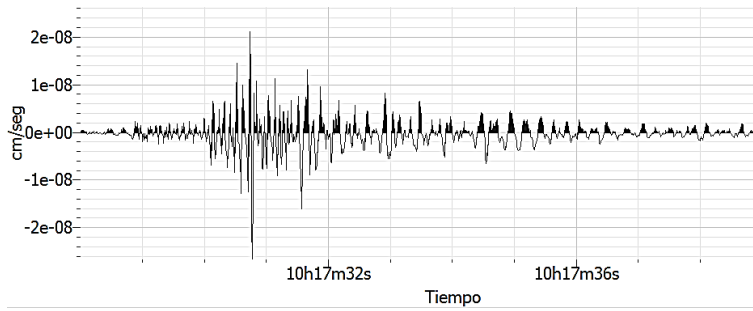
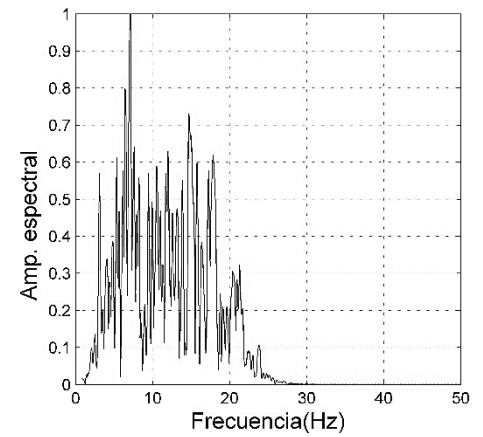
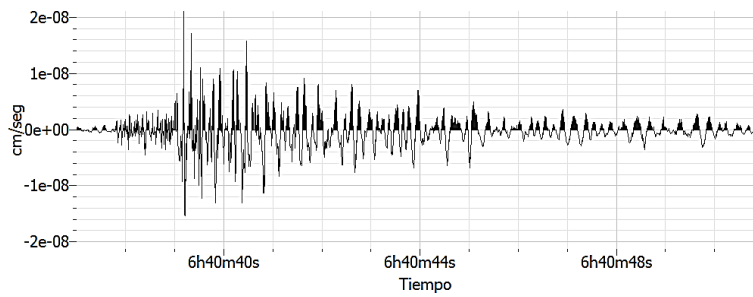
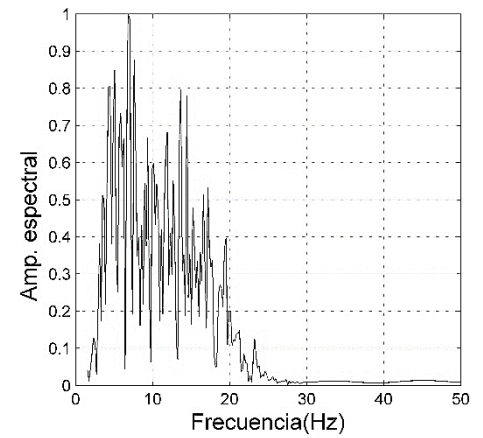
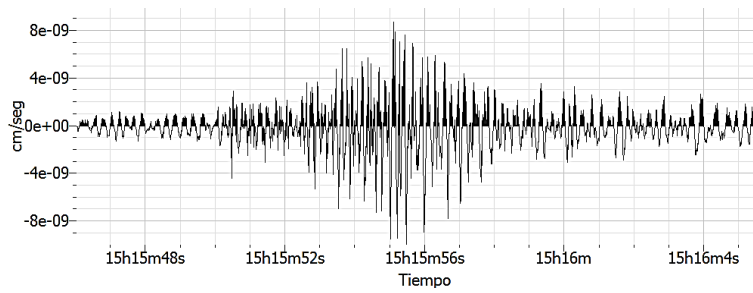
Evento 2.

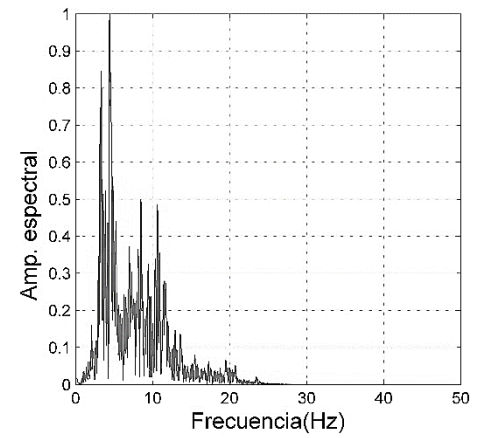
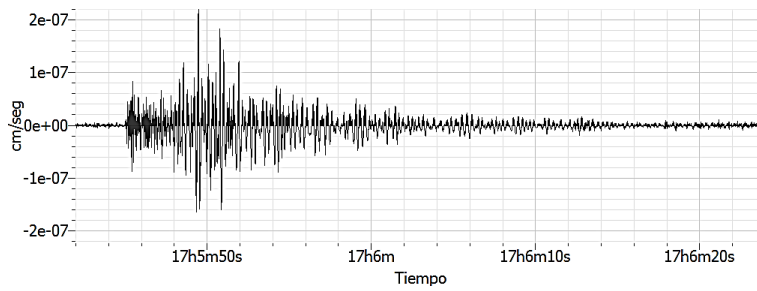
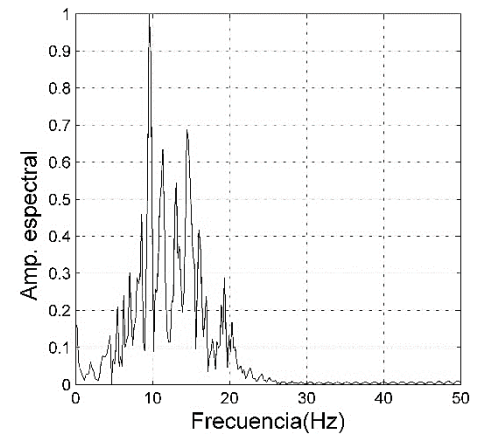
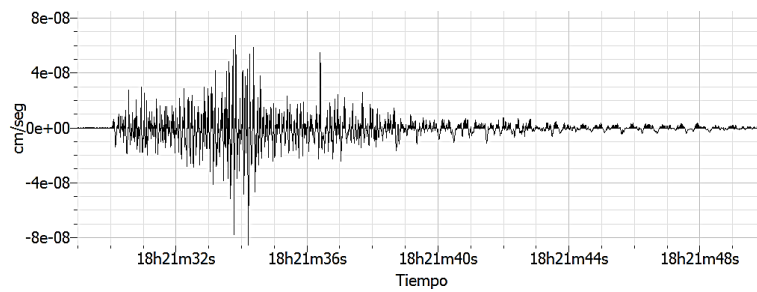
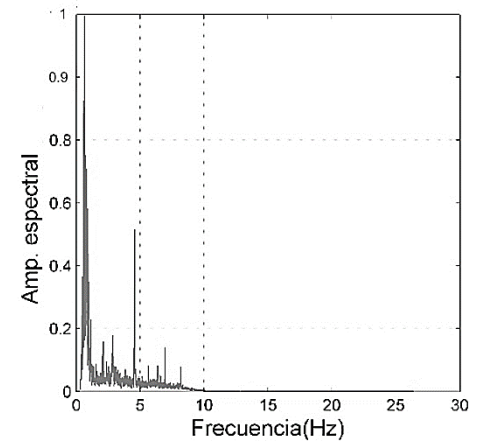
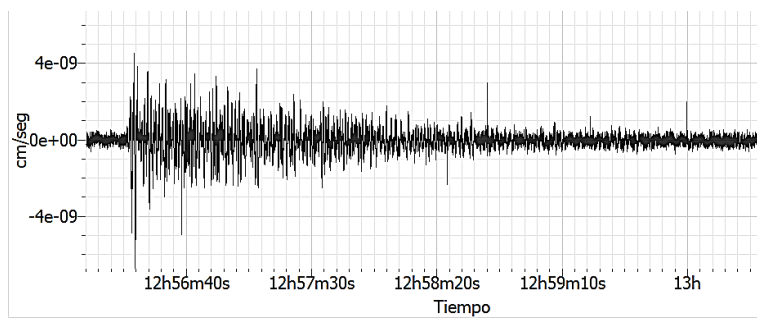


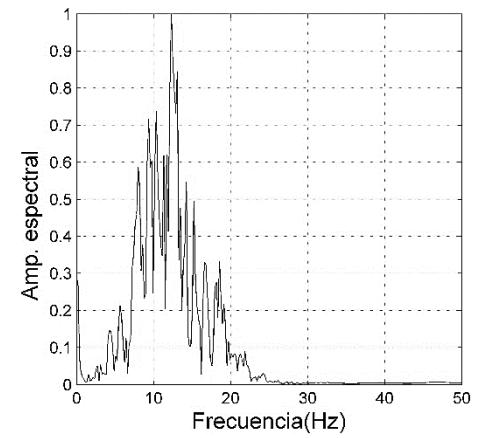
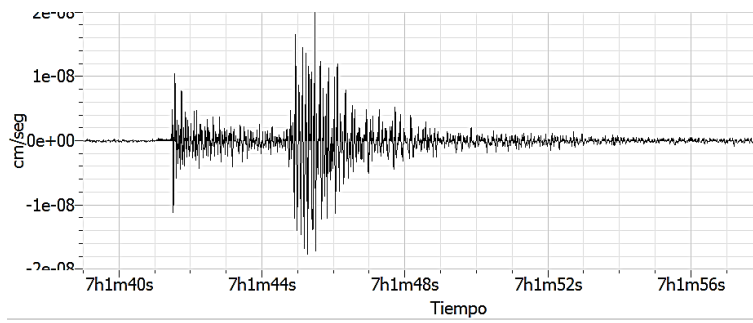
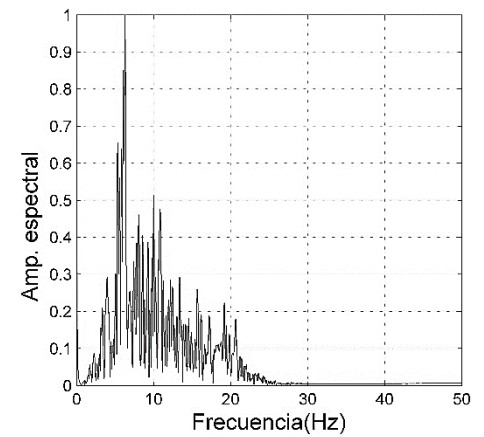
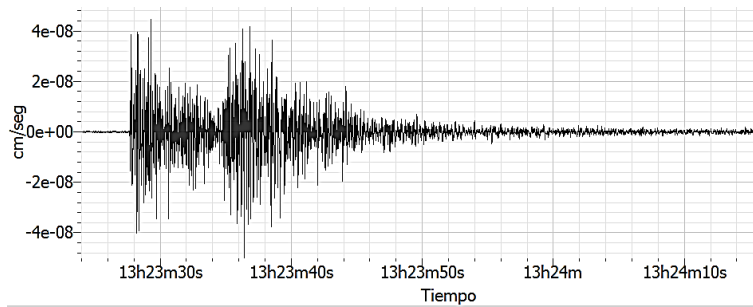
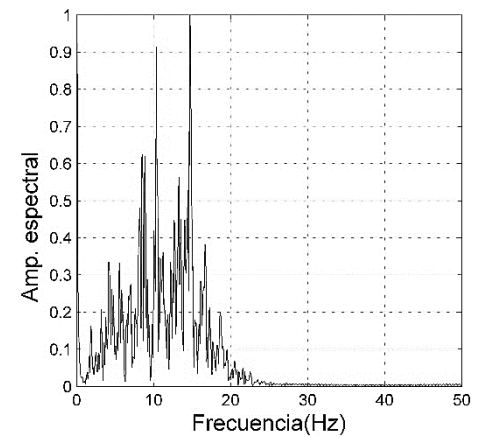
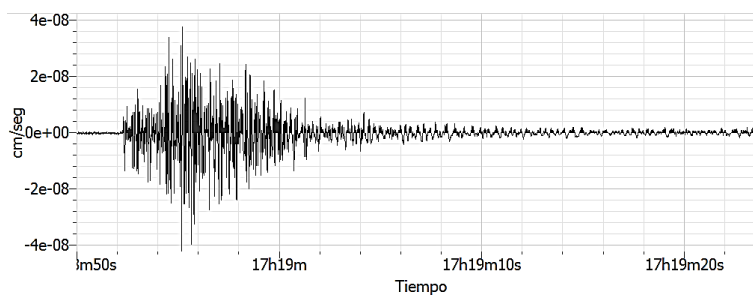
Evento 3.

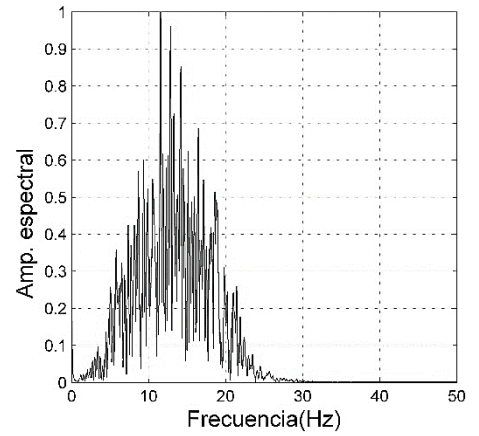
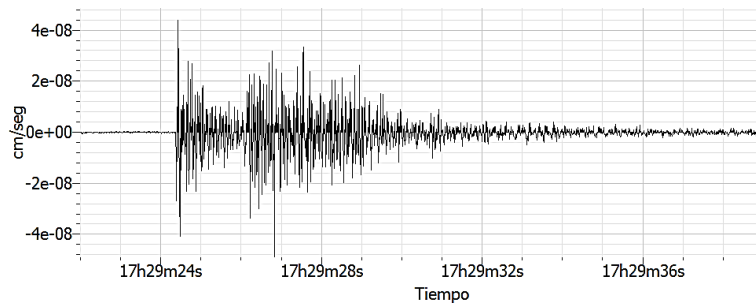
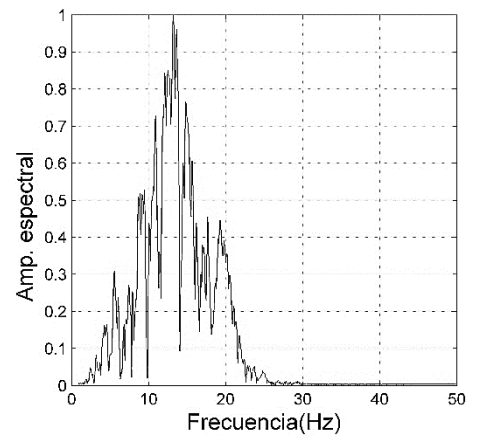
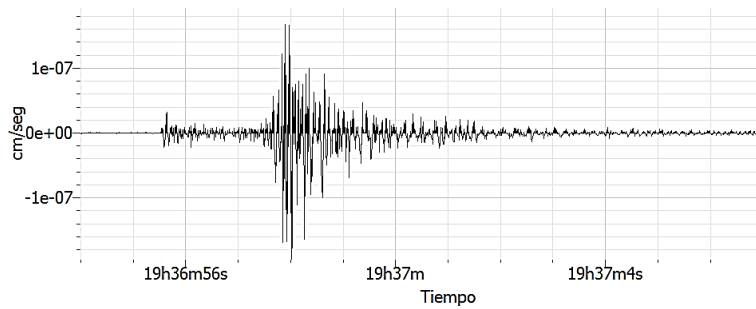
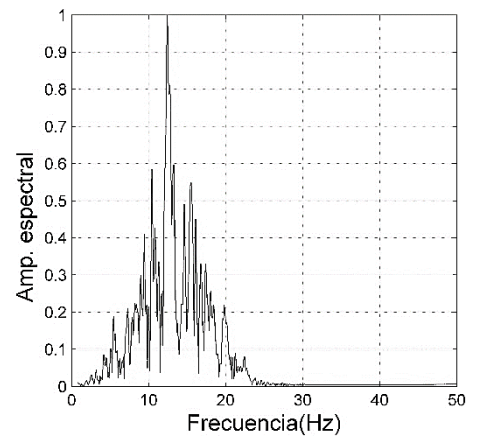
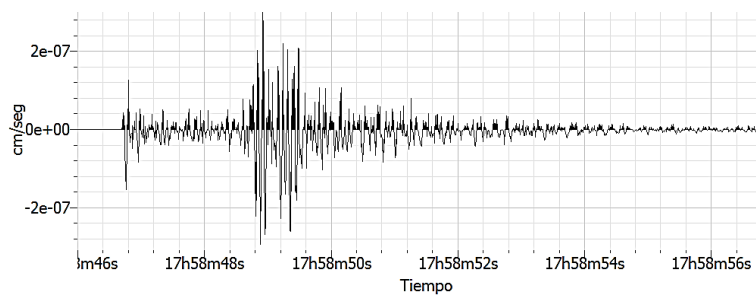
**Evento 4.****Evento 5.****Evento 6.**

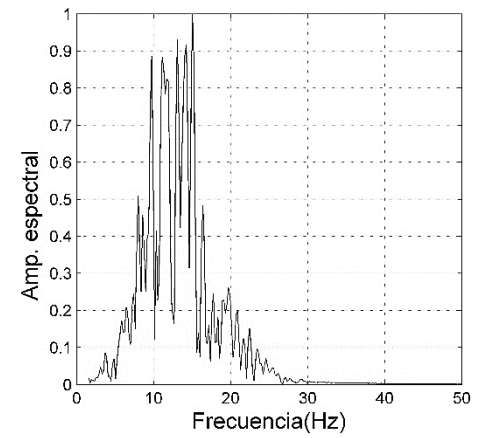
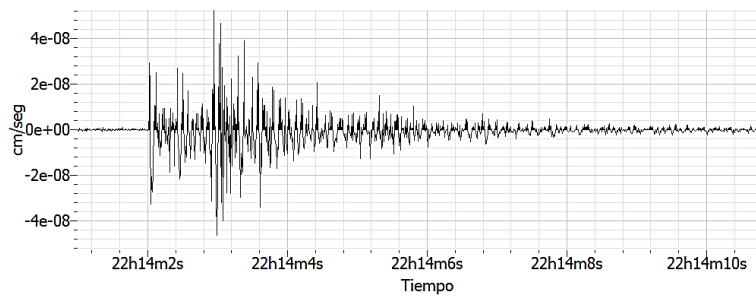
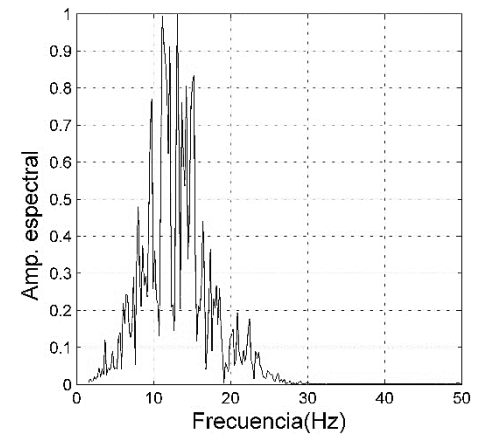
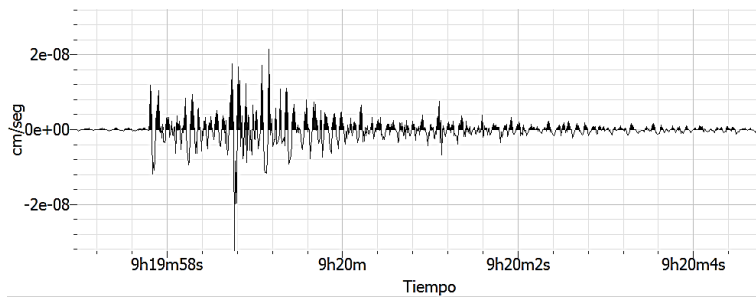
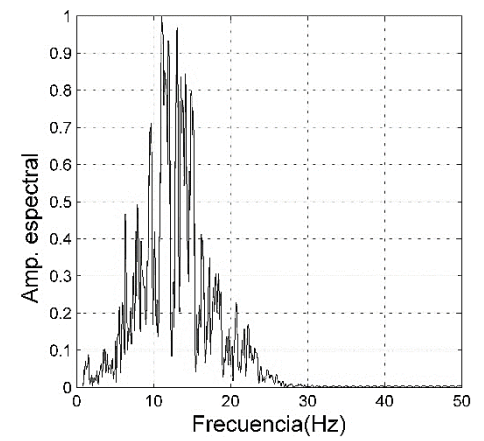
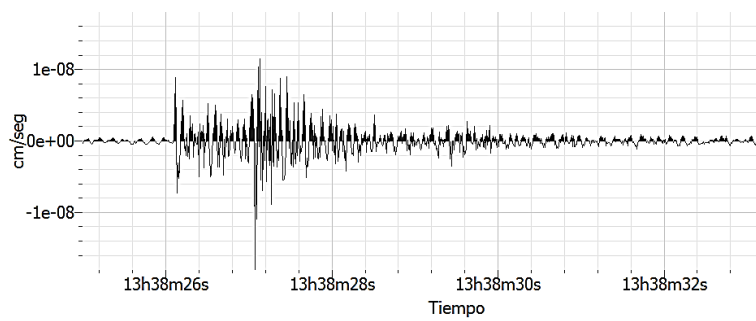
**Evento 7.****Evento 8.****Evento 9.**

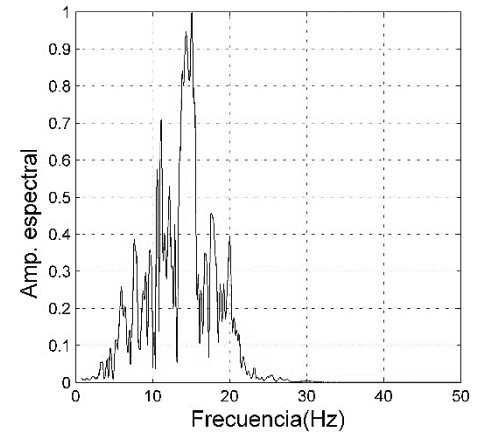
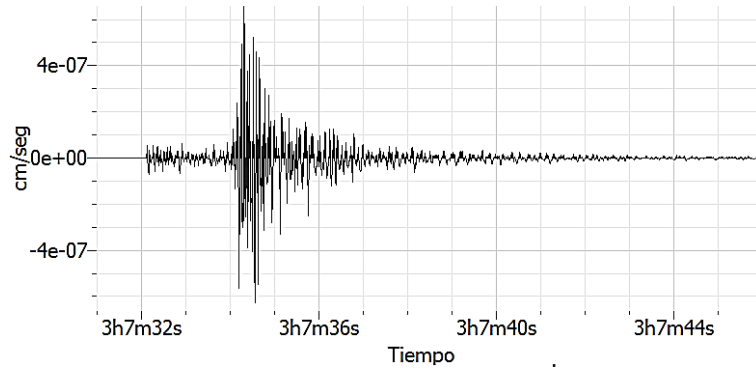
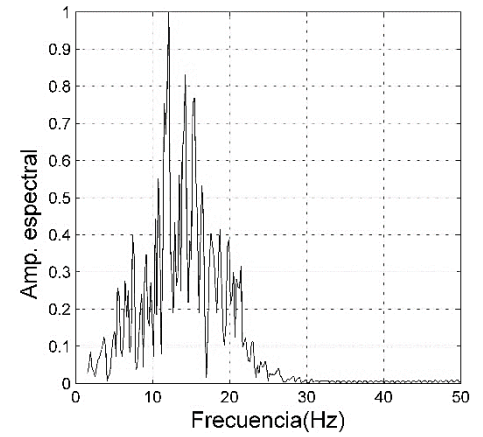
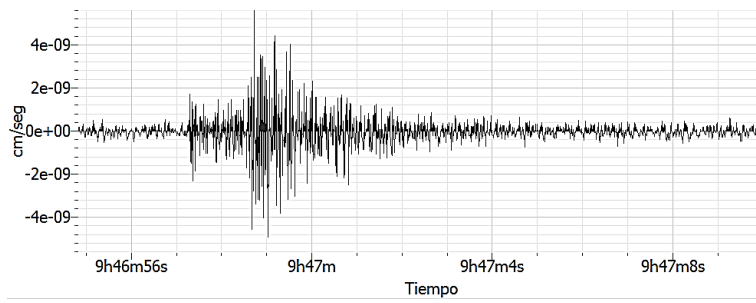
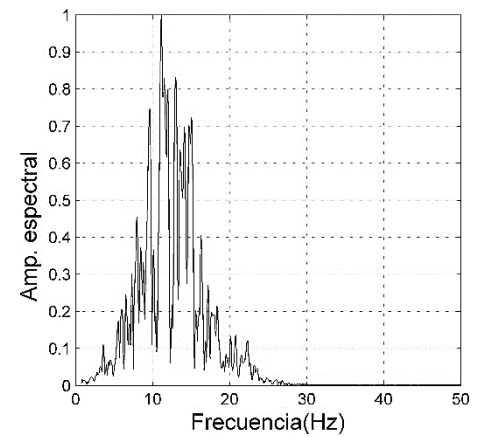
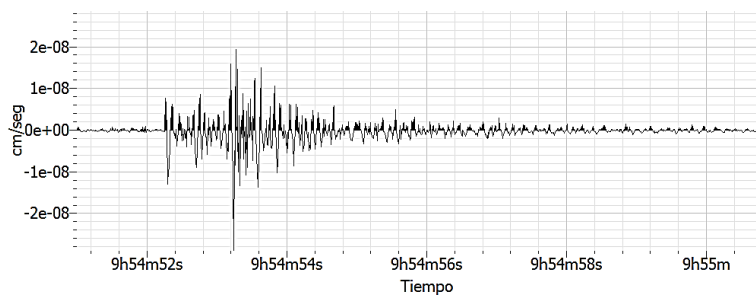
**Evento 10.****Evento 11.****Evento 12.**

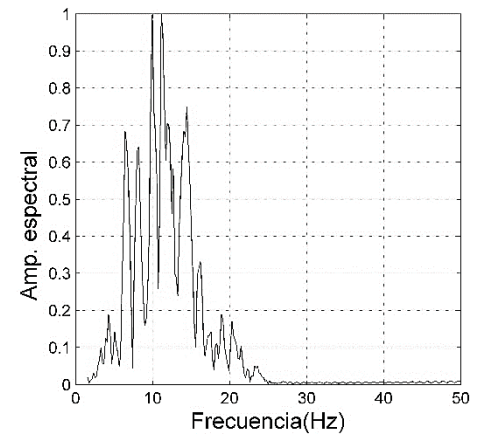
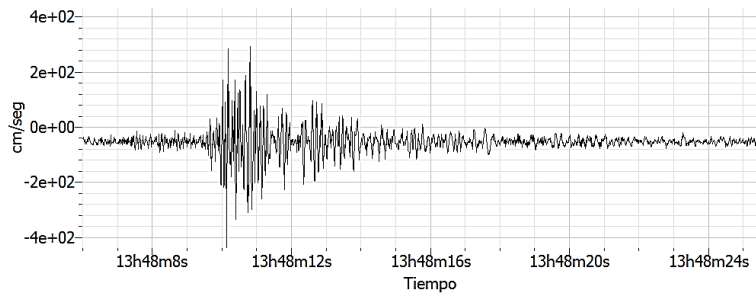
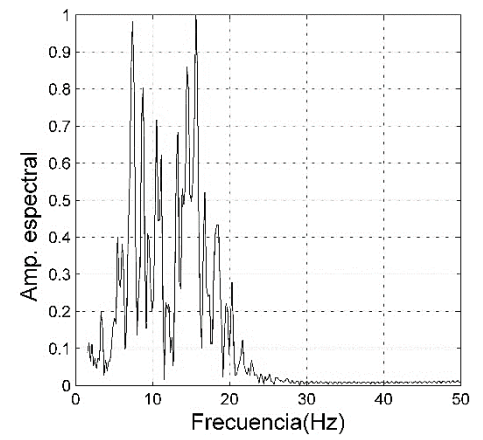
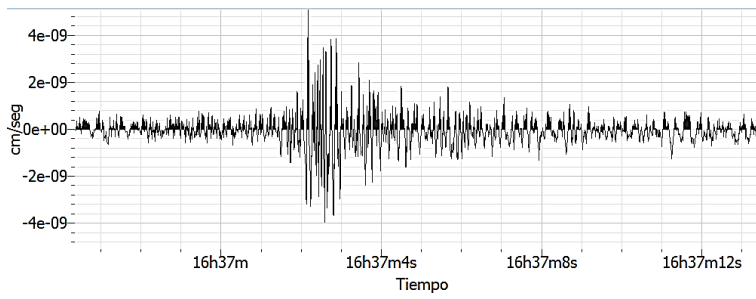
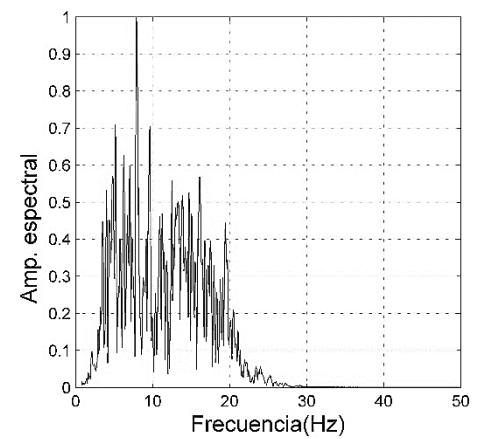
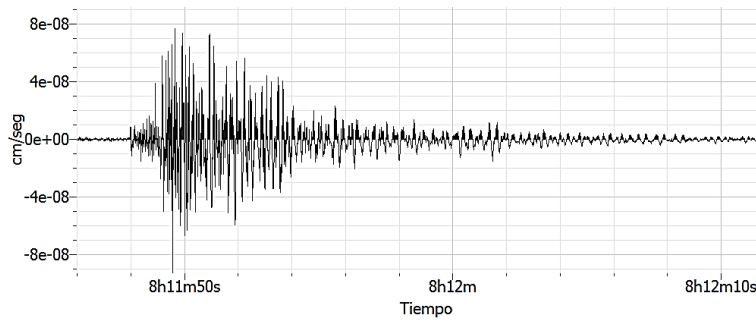
**Evento 13.****Evento 14.****Evento 15.**

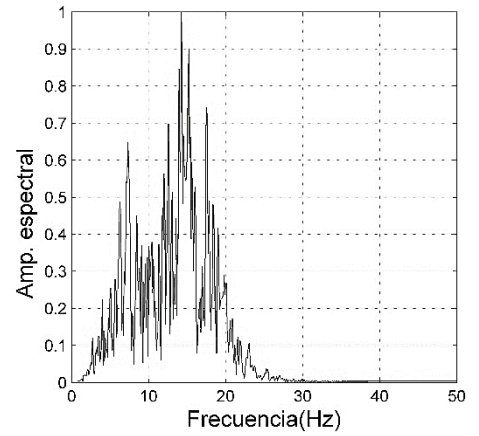
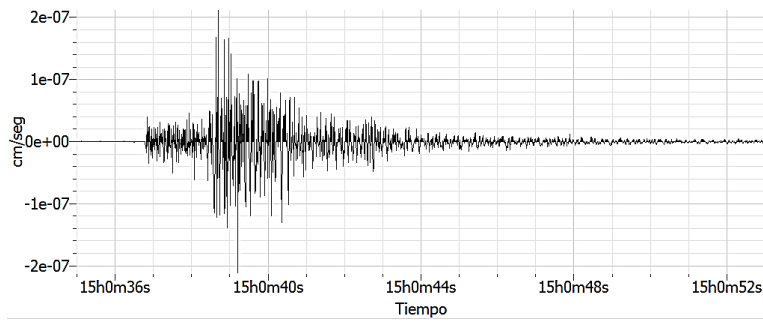
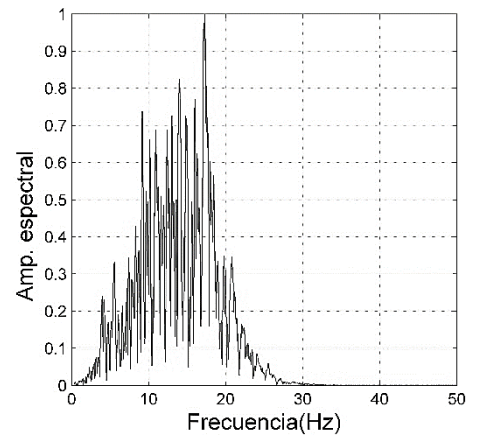
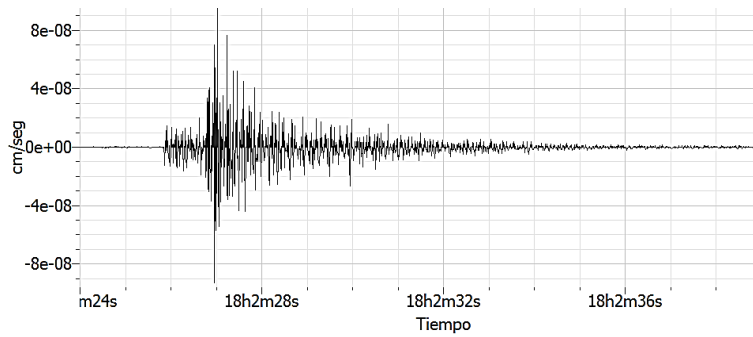
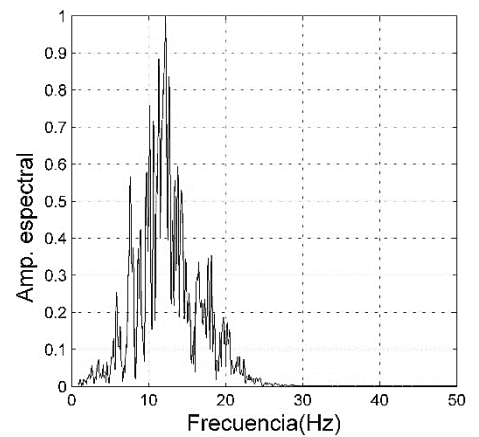
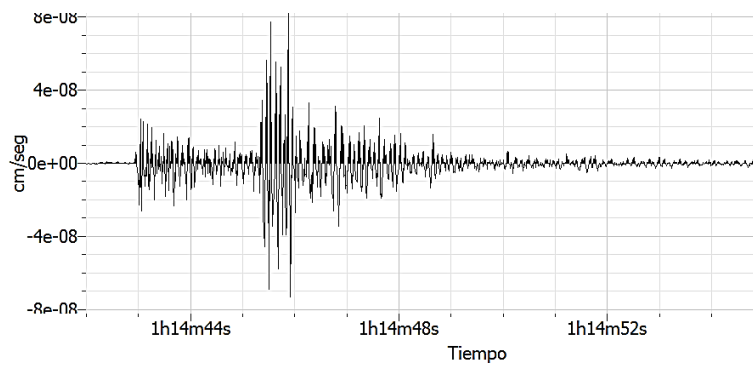
**Evento 16.****Evento 17.****Evento 18.**

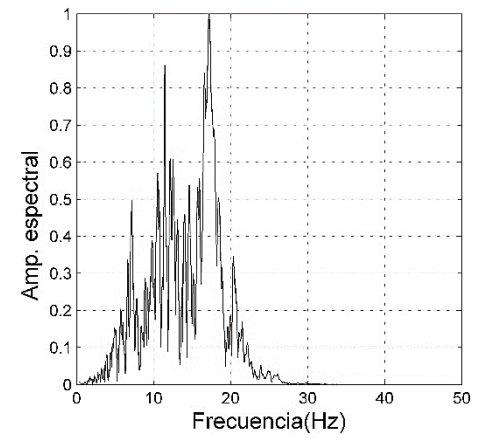
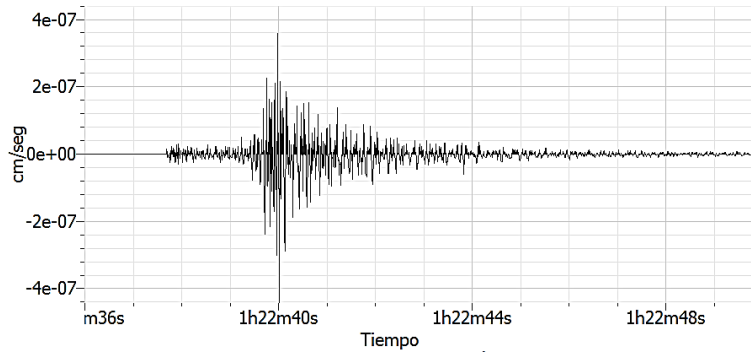
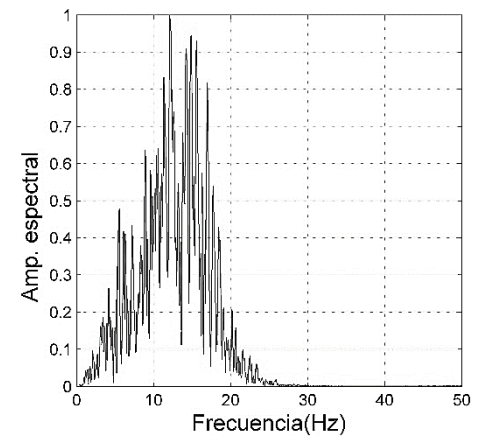
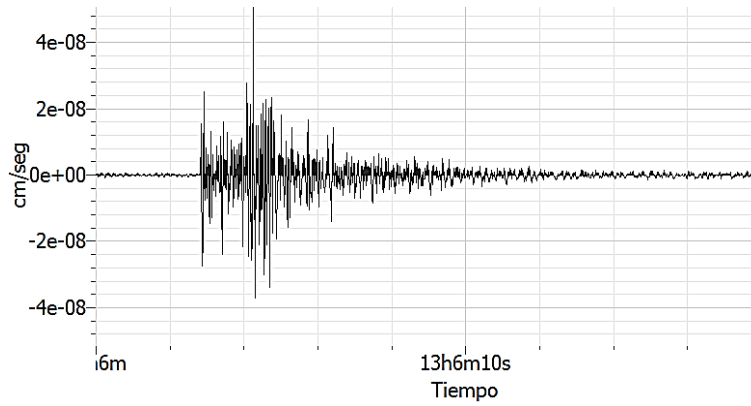
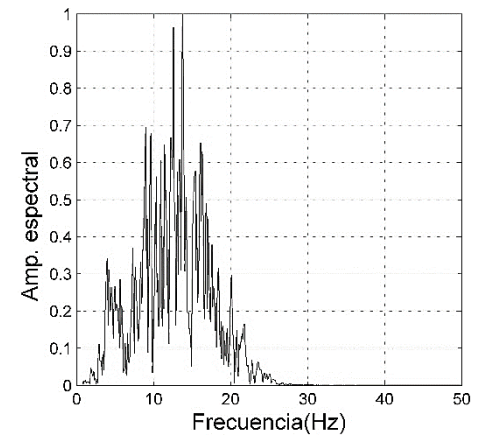
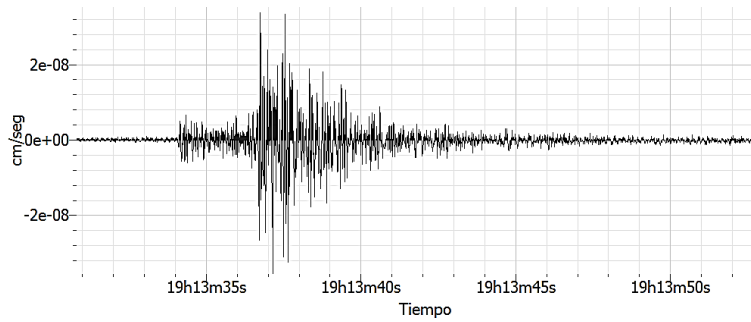
**Evento 19.****Evento 20.****Evento 21.**

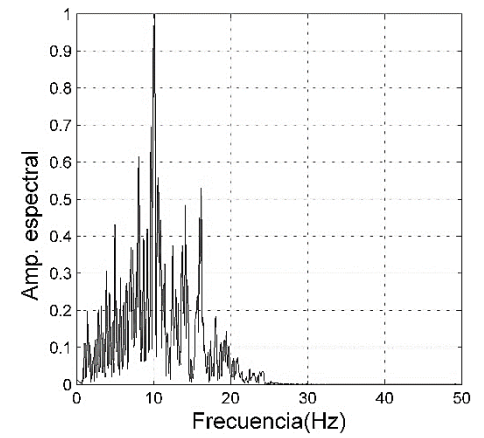
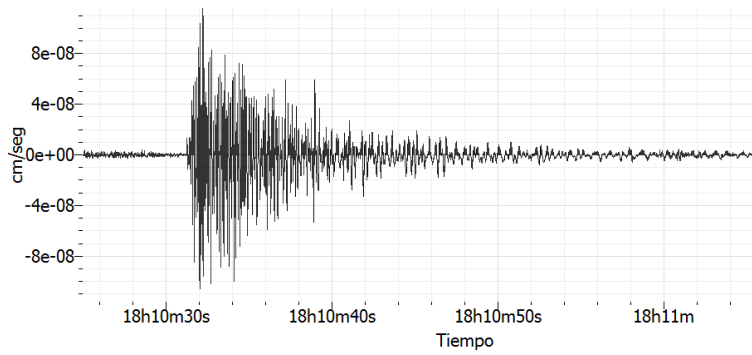
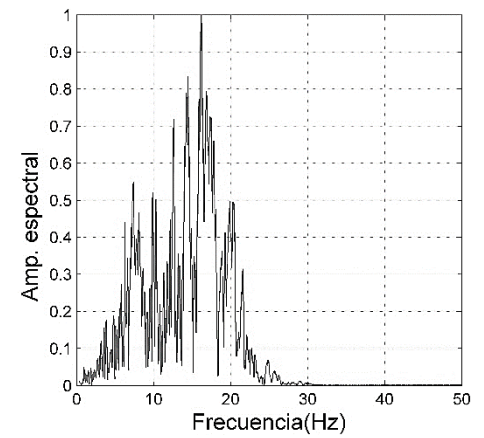
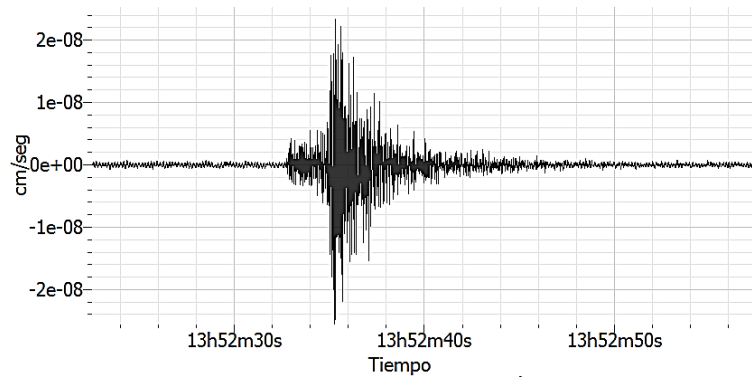
**Evento 22.****Evento 23.****Evento 24.**

**Evento 25.****Evento 26.****Evento 27.**

**Evento 28.****Evento 29.****Evento 30.**

**Evento 31.****Evento 32.****Evento 33.**

**Evento 34.****Evento 35.****Evento 36.**

**Evento 37.****Evento 38.**