



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE DATOS DE POZOS PRODUCTORES
E INYECTORES Y SU RELACIÓN CON LA
SISMICIDAD EN CAMPOS GEOTÉRMICOS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

PRESENTAN

AGUIRRE HERNANDEZ ERIC ÁNGEL

MENDOZA ROSSANO GERARDO ANTONIO

DIRECTOR DE TESIS

M.C. JAVIER FRANCISCO LERMO SAMANIEGO



CIUDAD UNIVERSITARIA, Cd. Mx., 2018

ÍNDICE:

Resumen.....	5
Abstract.....	6
Objetivo y Justificación.....	7
Alcances.....	7
Capítulo 1. Introducción.....	8
1.1. Geotermia y energía geotérmica.....	8
1.1.1. Recursos geotérmicos y su clasificación.....	8
1.2. La geotermia en el mundo.....	9
1.2.1. Desarrollo sostenible.....	10
1.3. La geotermia en México.....	11
1.3.1. Cerro Prieto.....	12
1.3.2. Los Azufres.....	13
1.3.3. Los Humeros.....	13
1.3.4. Las Tres Virgenes.....	14
1.4. Yacimientos geotérmicos.....	14
1.4.1. Muy baja temperatura.....	14
1.4.2. Baja temperatura.....	14
1.4.3. Media temperatura.....	15
1.4.4. Alta temperatura.....	15
1.5. Generación de energía.....	16
Capítulo 2. Antecedentes.....	19
2.1. Sismicidad en campos geotérmicos.....	19
2.1.1. Sismicidad tectónica.....	20
2.1.2. Sismicidad inducida.....	21
2.2. Investigaciones previas.....	22
2.2.1. Sismicidad inducida por cambios en el gasto de inyección.....	22
2.2.2. Estadística β , inducción de sismicidad por telesismo.....	24
2.2.3. Monitoreo por correlación cruzada de ruido sísmico.....	25
Capítulo 3. Conceptos Básicos.....	26
3.1. Pozos geotérmicos.....	26
3.1.1. Pozos exploratorios.....	27
3.1.2. Pozos productores.....	27
3.1.3. Pozos de desarrollo.....	27
3.1.4. Pozos de avanzada.....	28

3.1.5. Pozos inyectoros.....	28
3.2. Método de exploración.....	28
3.2.1. Sismicidad.....	28
3.3. Diagramas solución de un mecanismo focal.....	30
Capítulo 4. Metodología.....	32
4.1. Procesado de datos sísmicos y localización de eventos de interés.....	32
4.2. Modelo de Velocidad.....	44
Capítulo 5. Caso Base.....	45
5.1. Campo Tres Virgenes.....	45
5.1.1. Geología.....	46
5.1.2. Sistema de fallas.....	47
5.1.3. Actividad en el campo geotérmico de Tres Virgenes, B: C. S.....	48
5.2. Campo Los Humeros.....	50
5.2.1. Geología.....	51
Capítulo 6. Discusión y resultados.....	52
6.1. Datos de inyección, producción, sismicidad y fallas.....	53
6.1.1. Septiembre 2015.....	53
6.1.2. Octubre 2015.....	57
6.1.3. Febrero 2016.....	60
6.1.4. Junio de 2016.....	63
6.2. Gráficas anuales de sismicidad, producción e inyección.....	67
6.3. Estadística Beta aplicada.....	69
6.3.1. Campo Los Humeros, Puebla.....	69
6.3.2. Campo Tres Vírgenes, Baja California Sur.....	69
Conclusiones.....	71
Referencias.....	72
ANEXO 1: Datos de inyección.....	73
ANEXO 2: Sismos registrados en Puebla y BCS.....	83

RESUMEN

La sismicidad inducida es un fenómeno que se presenta cuando la actividad humana o factores externos intervienen en el aumento de la sismicidad registrada localmente en una región. Estudios previos realizados por Lermo et al. han sugerido la existencia de sismicidad inducida en campos geotérmicos ocasionada por diferentes factores. Con este antecedente, el fin de esta tesis fue comprobar la existencia de sismicidad inducida debida a los pozos de inyección presentes en un campo, o por eventos sísmicos de gran magnitud ocurridos alrededor del mundo.

Para esta tesis, se procesó información recopilada por una red sísmica temporal ubicada en las zonas de estudio. Este procesamiento se refiere a la recopilación e interpretación de los sismogramas obtenidos, la localización geográfica de los eventos locales observados, y la obtención de mecanismo focales compuestos de los sismos para su análisis. De esta manera se obtuvo una estadística de la sismicidad local en las zonas de estudio, así como su ubicación para identificar los eventos que están relacionados con los pozos inyectoros y los sistemas de fallas a sus alrededores.

Estos datos fueron comparados con la información proveniente de los pozos productores e inyectoros existentes en el campo geotérmico “Tres Vírgenes” (ubicado en Baja California Sur) durante los años 2015 y 2016, así como con los historiales de sismicidad obtenidos para las mismas fechas. De la misma manera se utilizaron los historiales de sismicidad registrada desde el año de 1990 por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) en los campos “Tres Vírgenes” en B.C.S. y “Los Humeros” en Puebla, encontrando una relación alta entre eventos telesísmicos ocurridos en diferentes partes del mundo y los aumentos en la tasa de sismicidad registrados. Esto siendo comprobado a través del cálculo de la “estadística Beta” utilizada en una comprobación similar realizada por Castro et al. (2017) en el sur de California.

Con los resultados obtenidos, se demostró la existencia de un aumento considerable en la tasa de sismicidad del campo geotérmico, causado tanto por cambios bruscos en los gastos de inyección de los pozos, como por los eventos sísmicos de mayor magnitud alrededor del planeta. Se llega a esta conclusión de gran importancia, pues señala la necesidad de tomar en cuenta factores como cambios bruscos de inyección y telesismos, para evitar posibles daños a la infraestructura, tanto superficial como subsuperficial y un mejor desarrollo de los campos geotérmicos del país.

ABSTRACT

Induced seismicity is a phenomenon that occurs when human activity or external factors cause an increase in the rate of local seismicity registered in a region. Previous studies conducted by Lermo et al. have suggested the existence of induced seismicity in geothermal fields caused by different factors. With this background, the purpose of this thesis was to verify the existence of induced seismicity caused by injection wells in the field, or by large-scale seismic events occurring around the world.

For this thesis, the information gathered by a temporary seismic network located in the study areas was processed. This processing refers to the collection and interpretation of the obtained seismograms, the geographic location of the observed local events, and the obtainment of composed focal mechanisms solutions for their analysis. As a result, a statistic for the local seismicity in the study zone was obtained, as well as their geographic location in order to identify the events that are related to the injector wells and fault systems around them.

This data was compared with information coming from the production and injection wells in the "Tres Vírgenes" geothermal field (located in Baja California Sur) during the years 2015 and 2016, as well as the seismicity records obtained for the same dates. In the same way, we used the seismicity records registered since 1990 by the National Seismological Service (NSS) in the "Tres Vírgenes" geothermal field in B.C.S. and "Los Humeros" in Puebla, finding a high relationship between teleseismic events occurring in different parts of the world and the increases in the recorded seismicity rate. This was verified through the calculation of the "Beta statistics" used in a similar study carried out by Castro et al. (2017) in Southern California.

With the obtained results, it was shown the existence of a considerable increase in the seismicity rate of the geothermal fields, caused either by abrupt changes in the flow of the injection wells, or by the larger seismic events occurred around the planet. This conclusion of great importance is reached, as it indicates the need to consider factors like sudden injection changes and teleseismic in order to avoid possible damage to infrastructure, both superficial and subsuperficial and a better development of the country's geothermal fields.

OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo el encontrar una relación entre cambios bruscos en la sismicidad local registrada en un campo geotérmico, con las operaciones de perforación, producción y reinyección que se llevan a cabo en la zona, así como con el efecto de sismos de gran magnitud ocurridos alrededor del mundo, conocidos como telesismos.

También se revisan los sistemas de fallas presentes en los campos a analizar junto con la ubicación de los pozos productores e inyectores, para descubrir si favorecen la formación de sismicidad inducida, o si no existe relación alguna.

Este estudio resulta importante debido a que esta sismicidad inducida, al alcanzar magnitudes relativamente altas, según su ubicación nos puede indicar la ubicación de nuevas zonas de fractura para aumentar o ampliar la producción en la zona, sin embargo, también puede ocasionar cambios en las tasas de producción, y causar daños a las instalaciones superficiales, lo que ocasiona pérdidas de grandes cantidades de dinero a los responsables de los proyectos. Esto se realiza con el objetivo de evitar pérdidas económicas que puedan llevar al fracaso de un proyecto debido a una mala planeación, debido a que la energía geotérmica conforma una fuente importante de energía limpia y renovable producida en el país, que además posee un gran potencial a desarrollar si se manejan adecuadamente los proyectos futuros.

ALCANCES

En este trabajo de de investigación, se tomó como información datos de sismicidad así como producción-inyección recabados del campo geotérmico Tres Vírgenes del año 2015 al 2016, para el proceso de localización de sismos en la región y su relación con los gastos de producción-inyección de los pozos operantes de la zona; este intervalo de tiempo fue elegido debido a que dichos años eran los más recientes de los que se contaba con información de producción-inyección completa para realizar el análisis propuesto en la tesis.

Aunque el planteamiento inicial contemplaba utilizar datos de producción-inyección del año 2017, además de realizar el mismo análisis para el campo geotérmico de Los Humeros, en Puebla, esto no se pudo llevar a cabo debido a que no fue posible obtener una respuesta por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) al solicitar los datos faltantes.

De igual manera, es necesario realizar un estudio que investigue la relación entre las actividades de perforación y una posible inducción de sismicidad, que también pudo formar parte de este trabajo si se hubiese contado con fuentes de información al respecto.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. La Geotermia y energía geotérmica.

La geotermia es una rama de la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta. También se refiere al conjunto de procesos industriales necesarios en la extracción de la energía térmica de la tierra, asociada a volcanes, géiseres y fumarolas, para producir energía eléctrica. (Servicio Geológico Mexicano, 2017)

La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra. El calor interior de la Tierra se alimenta de la desintegración de isótopos radiactivos y de los movimientos diferenciales entre las capas terrestres, así como del calor latente de la cristalización del núcleo externo. Sin embargo, el calor contenido en rocas y suelos es demasiado difuso para ser extraído directamente, por lo que es necesario disponer de un fluido, generalmente el agua, para transportar el calor hacia la superficie de forma concentrada. Una vez en superficie las aplicaciones que se pueden dar al fluido geotermal dependen de su contenido de calor, o entalpía, que es la cantidad de energía térmica que puede intercambiar con su entorno. La entalpía no puede medirse directamente, pero es casi proporcional a la temperatura, por lo que en la práctica habitual se utilizan las temperaturas de los fluidos para establecer los rangos de utilización de esta energía.

1.1.1. Recursos geotérmicos y su clasificación.

Un recurso geotérmico es una concentración de calor que existe en la corteza terrestre en forma y cantidad, tales que su extracción económica es actualmente o potencialmente posible para su explotación por el hombre.

Se establecen cuatro grandes tipos entre intervalos de temperatura (Llopis & Rodrigo, 2008):

- Alta temperatura: más de 150 °C: Permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica.
- Media temperatura: entre 90 y 150 °C: Permite producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio
- Baja temperatura: entre 30 y 90 °C: Su contenido de calor es insuficiente para producir energía eléctrica. Calefacción de invernaderos y piscinas.
- Muy baja temperatura: menos de 30 °C: Puede utilizarse para calefacción o climatización, utilizando bombas de calor.

1.2. La Geotermia en el Mundo

Para atender la alta demanda respecto a la actualización de la capacidad instalada a nivel global de energía geotérmica para la producción de electricidad, varios países alrededor del mundo cuentan con campos geotérmicos en desarrollo.

Con la información obtenida a enero de 2017 existen 13.270 MW de capacidad geotérmica instalada, distribuidos en 24 países alrededor del mundo, para generación de electricidad. Con los proyectos en desarrollo, la capacidad podría aumentar hasta 14.165 MW en los próximos años ayudando así al abasto de energía el cual aumenta cada vez más conforme crece la humanidad.

Los datos se basan en información estadística de una base de 5 años del Global Geothermal Power Market, de la Asociación Internacional de Geotermia (IGA) como también de varias fuentes nacionales e internacionales. En la siguiente imagen (Figura 1) se pueden observar las capacidades instaladas de producción de eléctrica geotérmica de los principales países productores.

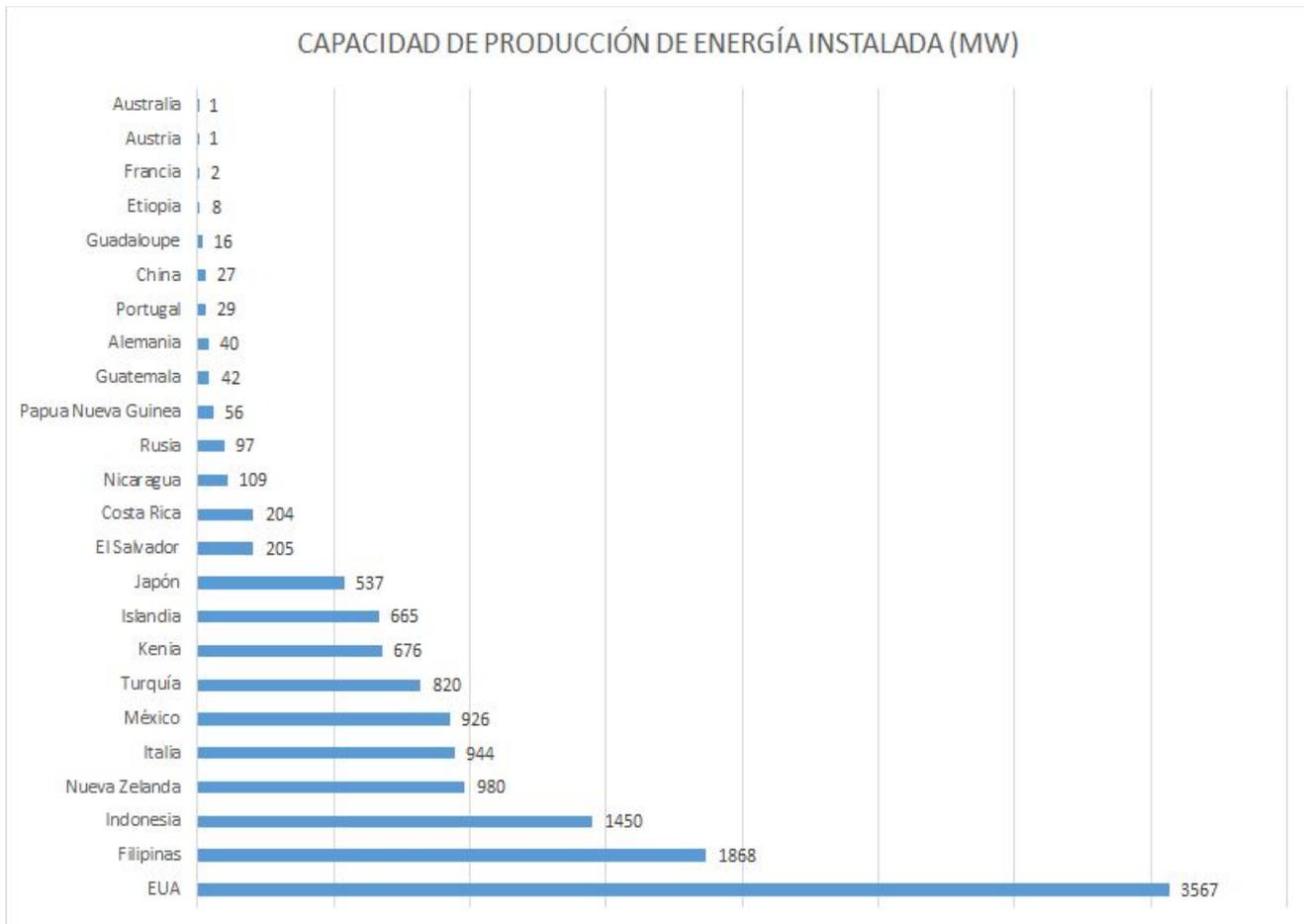


Figura 1: Principales países productores de energía geotérmica a enero de 2017 (TGE Research (2017), GEA (2017, IGA (2016)).

Se espera que para los próximos años la energía geotérmica tome un papel más importante a nivel mundial, no solo como una de las fuentes de energía renovable con mayor potencial, si no como una de las principales fuentes de energía llegando a competir con los combustibles fósiles, esto se explica con los estudios que se realizan cada año en todo el mundo (BP Energy Outlook 2018) en donde se listan las distintas fuentes de energía y el porcentaje del consumo humano que produce cada una.

En la actualidad, el carbón, el petróleo y el gas son las principales fuentes para la generación de energía. Sin embargo, estos son recursos no renovables, y su producción declina con los años, mientras que la demanda de energía aumenta exponencialmente con el crecimiento de la población, por lo que resulta necesario para el futuro de la humanidad que se domine y se aumente la producción proveniente de muchas fuentes alternativas.

La humanidad aún está a tiempo de enfocar sus esfuerzos y recursos a la generación y desarrollo de las energías renovables para evitar una crisis energética cuando la demanda de energía rebase la capacidad de producción y generación de los hidrocarburos. Aunque las energías renovables siguen en desarrollo, los esfuerzos e inversiones para este fin podrían ser mayores, para mejorar sus capacidades de producción. La geotermia está en la mira de los países desarrollados del mundo, y seguramente llegará a ser una de las fuentes más importantes de generación de energía en el futuro cercano, lo que resultará benéfico para la humanidad y el medio ambiente.

1.2.1. Desarrollo sostenible

La energía geotérmica representa una opción ecológica, renovable y económicamente sustentable para la generación de energía eléctrica; a la escala del planeta, la energía geotérmica es el recurso más grande que existe, y estará disponible muchos años para generaciones futuras siempre que la explotación se realice de forma racional.

Si el medio de explotación es el agua subterránea, ésta se renueva de forma natural por recarga con aguas superficiales o por inyección artificial en el subsuelo, por lo que se considera un recurso renovable.

Además, ninguna instalación que emplee energía geotérmica precisa quemar combustibles, por lo que no contribuye a la emisión de gases de invernadero y la cantidad media de CO₂ emitida por las centrales geotermoeléctricas en el mundo es de 55 g/kWh, mientras que en una central de gas natural se emite hasta 10 veces más. En la Figura 2 se presenta una gráfica comparativa de las emisiones de este gas contaminante producidas por las diferentes fuentes de energía.

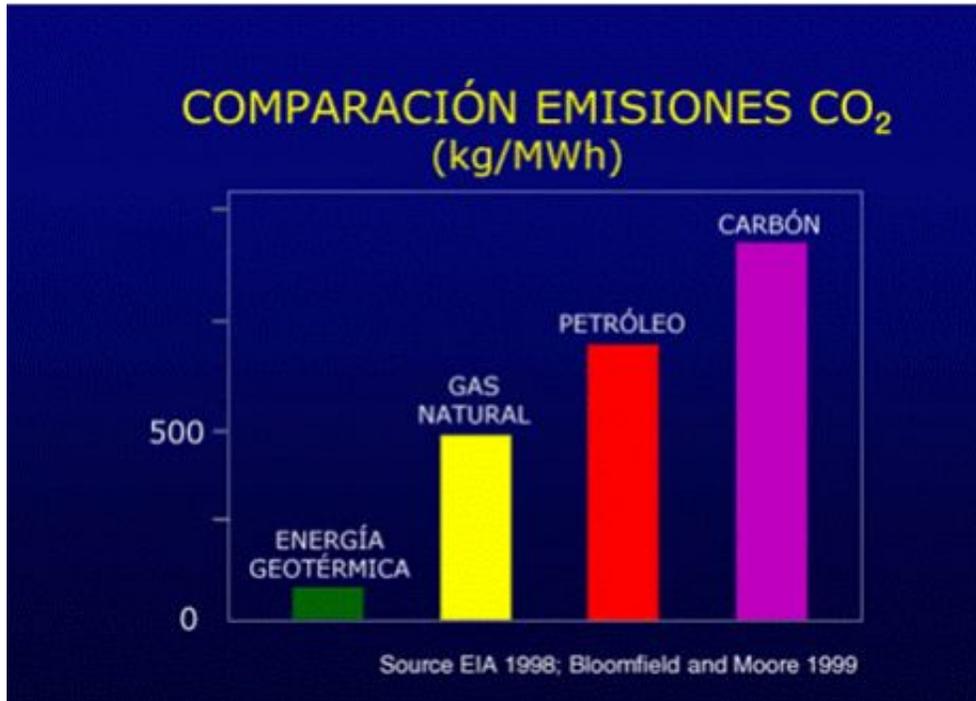


Figura 2. Comparación de emisiones de CO₂ entre distintos tipos de energía.

1.3. La Geotermia en México

México es uno de los principales productores de energía geotérmica en el mundo; con su producción actual se encuentra ubicado como el sexto país generador de este tipo de energía.

El aprovechamiento de la energía geotérmica es de vital importancia y una apuesta al futuro que México debe tener presente, debido a la posibilidad de producir gran cantidad de energía s de producción en comparación con otros tipos de energía y el potencial que se tiene en todo el país (exceptuando la península de Yucatán) ponen el desarrollo de la energía geotérmica como una pieza clave para reducir la dependencia de gas de estados unidos, las toneladas de CO₂ liberadas a la atmósfera y aumentar la cantidad de energía limpia utilizada en el país.

Con la actual reforma energética se desarrolló una ley de energía geotérmica para que la CFE como empresa productora del estado junto con otras empresas puedan explotar y desarrollar este tipo de industria en el país. Actualmente se cuenta con 5 grandes proyectos que se reparten la producción del país, 4 manejados por la CFE y uno por empresa privada, en la siguiente tabla (Tabla 1) se muestran estos campos y la correspondiente producción de cada uno:

Campos del país	Capacidad instalada
Cerro Prieto, Baja California	570 MWe
Los Azufres, Michoacán	248 MWe
Los Humeros, Puebla	94 MWe
Las Tres Vírgenes, Baja California Sur	10 MWe
Domo San Pedro. Nayarit	10 MWe

Tabla 1: principales campos geotérmicos de México

1.3.1. Cerro Prieto

Se localiza a unos 13 metros sobre el nivel del mar (msnm) en la planicie aluvial del Valle de Mexicali, dentro de una cuenca tectónica transtensional formada entre las fallas laterales Imperial y Cerro Prieto-Cucupah que pertenecen al sistema de San Andrés.

Es un campo sedimentario con un yacimiento geotérmico hidrotermal de líquido dominante, cuyos fluidos están contenidos en areniscas intercaladas con lutitas del Terciario Medio-Superior, que descansan sobre un basamento predominantemente granítico.

Las principales características del campos son:

- -La capacidad instalada es de 720 MW
- -4 unidades de 110 MW c/u
- 4 unidades de 37.5 MW c/u
- 1 unidades de 30 MW de baja presión
- 4 unidades de 25 MW c/u
- 4 unidades fuera de operación de 37.5 MW c/u
- La capacidad operativa es de 570 MW
- Se generan poco más de 4,000 gigawatts-hora anualmente (GWh)

Todo lo anterior es alimentado por las 4 mil toneladas por hora (t/h) de vapor proporcionado por 160 pozos productores. Se tienen además, 17 pozos inyectores para devolver al subsuelo parte del agua residual (CeMIEGeo, 2017).

1.3.2. Los Azufres

Está ubicado en la porción central de México, dentro de la llamada Faja Volcánica Mexicana, a una altitud media de 2,850 msnm. Es un campo volcánico cuyos fluidos están alojados en rocas principalmente andesíticas de edad Mioceno-Plioceno, cubiertas por riolitas de edad cuaternaria.

Las principales características del campos son:

- Opera una unidad de 50 MW
- 4 de 26.5 MW c/u
- 7 de 5 MW c/u
- La capacidad en operación es de 191 MW
- Plantas que no operan
 - 2 plantas de ciclo binario de 1.5MW c/u
- La CFE opera
 - Pozos productores = 40
 - Inyectores = 6
 - Producción media de 1,700 t/h
 - Por año se generan más de 1500 GWh
- Enero 2015
 - Nueva unidad de 50 MW
 - Retiro de 3 unidades antiguas de 5 MW
 - Nueva capacidad operativa será de 226 MW

1.3.3. Los Humeros

Los Humeros se encuentra también dentro de la Faja Volcánica Mexicana pero en su porción oriental, a una elevación promedio similar a la de Los Azufres. La CFE ha desarrollado este campo dentro de una caldera volcánica de unos cien mil años de antigüedad, llamada Caldera de Los Potreros, anidada en otra caldera mayor y ligeramente más antigua conocida como Caldera de los Humeros.

Las principales características del campos son:

- La capacidad instalada del campo es de 93.4 MW
- 2 unidades de 26.7MW c/u
- 8 unidades de 5MW c/u
- Operan como respaldo 2 unidades
- La capacidad operativa es de 68.4 MW
- La CFE opera
 - Pozos productores = 23
 - Inyectores = 2
 - Producción de vapor de 630 t/h
 - Generación de 340 GWh
- 2016
 - 1 unidad más de 26.7MW
 - Retiro de 3 unidades de 5 MW

- Capacidad efectiva Capacidad en operación de 191 MW

1.3.4. Las Tres Virgenes

Localizado a la mitad de la península de Baja California, dentro del complejo volcánico cuaternario del mismo nombre y a unos 750 msnm. Este importante mencionar que este fue campo geotérmico que se seleccionó efectuar el trabajo de investigación de esta tesis.

El campo contiene un yacimiento hidrotermal de líquido dominante en el que los fluidos están alojados de un basamento granítico cretácico, que es parte del Batolito Peninsular, en Baja California, y la fuente de calor parece ser una cámara magmática que alimenta al volcán más reciente y más meridional de la línea de tres volcanes que le dan nombre al complejo.

Las principales características del campos son:

- 4 pozos que producen menos de 100 t/h de vapor
- Se generan unos 55 GWh al año
- 2 en operación para regresar la salmuera al yacimiento

La CFE planea instalar una unidad de ciclo binario de 2 MW para aprovechar la abundante producción de salmuera caliente antes de re inyectar al yacimiento.

1.4. Yacimientos geotérmicos

Cuando en un área geográfica concreta se dan determinadas condiciones geológicas y geotérmicas que permiten la explotación económica de los recursos geotérmicos del subsuelo, se dice que allí existe un yacimiento geotérmico. Estos yacimientos, por igual, suelen clasificarse por su temperatura:

1.4.1. Muy baja temperatura:

Prácticamente la totalidad de la corteza constituye un yacimiento de recursos geotérmicos de muy baja temperatura, menos de 30° C, interrumpido por la presencia de masas de agua. En cualquier punto de la superficie se puede captar y aprovechar el calor almacenado en el subsuelo, a pocos metros de profundidad, para la climatización de casas por medio de bombas de calor geotérmicas. A partir de 15 metros de profundidad se puede decir que la temperatura de las rocas se mantiene estable y no se ve afectada por los intercambios de temperatura con la atmósfera y, a partir de 20 metros de profundidad aumentará a una razón de unos 3° C por cada 100 metros, como consecuencia del gradiente geotérmico.

1.4.2. Baja temperatura:

Entre 30 y 90 °C, pueden encontrarse en cuencas sedimentarias con un gradiente geotérmico normal o ligeramente superior, a una profundidad adecuada de entre 1,500 y 2,000 metros, con formaciones

geológicas permeables que puedan contener y dejar circular fluidos que extraigan el calor de las rocas.

1.4.3. Media temperatura:

Temperaturas de entre 90 y 150 °C, ubicados en numerosos lugares del planeta, también en cuencas sedimentarias, pero con profundidades comprendidas entre 2,000 y 4,000 metros; en zonas de adelgazamiento litosférico, alta concentración de isótopos radiactivos, o en el mismo ámbito que los de alta temperatura, pero a menor profundidad. Precisan de una intrusión magmática como fuente de calor, y de un acuífero con buena recarga. A diferencia de los de alta temperatura, no presenta una capa impermeable sobre el acuífero que mantenga el calor y la presión del yacimiento.

1.4.4. Alta temperatura:

Yacimientos con fluidos geotermales o rocas calientes a más de 150 °C. Se encuentran en zonas geográficas con un gradiente geotérmico muy elevado, de hasta 30 °C por cada 100 metros. Suelen coincidir con la existencia de fenómenos geológicos notables, como actividad sísmica, formación de cordilleras recientes, actividad volcánica reciente y regiones volcánicas situadas en los bordes de las placas litosféricas. Estos fenómenos son distintas formas de liberación de la energía interna de la Tierra, como consecuencia de los movimientos de convección de masas de rocas fundidas. Se encuentran a profundidades entre 1,500 y 3,000 metros. Este tipo de yacimientos suele estar asociado a manifestaciones superficiales como géiseres, fuentes termales, fumarolas, etc.

Un modelo de yacimiento geotérmico de alta temperatura debe reunir tres condiciones geológicas básicas:

- Fuente de calor: un magma de entre 700 a 1000 °C, a 5-10 km de la superficie.
- Acuífero: Una capa de rocas calientes permeables de las que el agua en circulación pueda extraer el calor, conectada a un área de recarga superficial. En fase líquida o vapor.
- Capa impermeable: situada sobre el acuífero para que mantenga el agua atrapada y la presión del mismo.

Cuando el agua asciende por un pozo de extracción, la presión disminuye bruscamente, generando una gran cantidad de vapor. Una vez separado el vapor con un separador de fases, pasará a una turbina para la generación de energía eléctrica. A estos yacimientos se les denomina de vapor húmedo, por la presencia de agua en el cabezal del pozo. Un ejemplo de esto es Cerro Prieto, en México.

Si para la presión de yacimiento, la temperatura es superior a la de saturación correspondiente, habrá un sobrecalentamiento que no contendrá agua líquida. Estos yacimientos se conocen como de vapor seco, y proveen un mejor rendimiento en las turbinas generadoras. En la Figura 3 se muestra un mapa con los recursos geotérmicos alrededor del mundo clasificados por su temperatura:

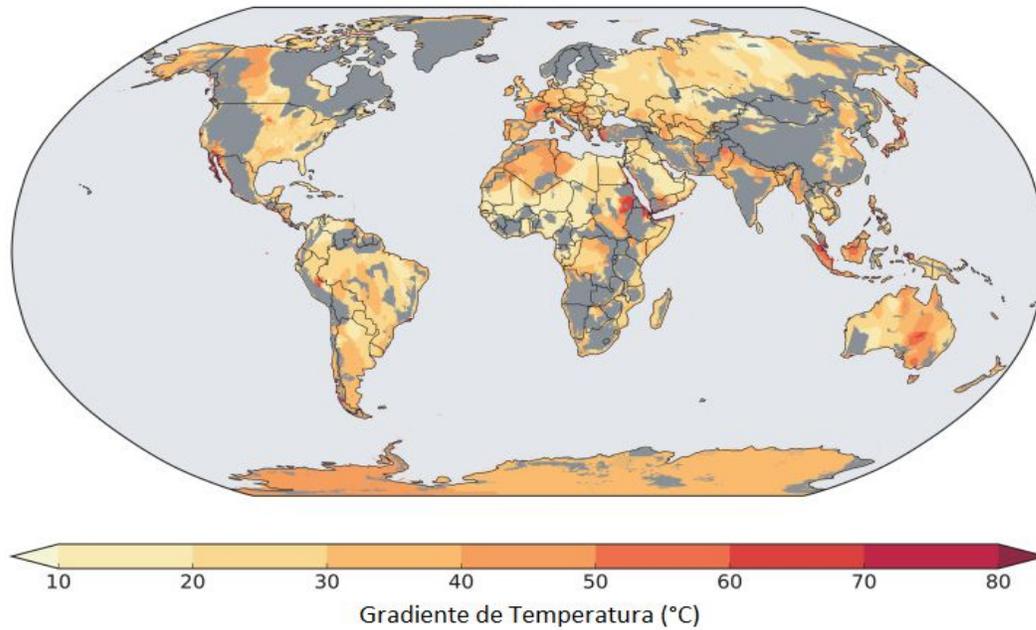


Figura 3. Recursos geotérmicos mundiales por temperatura. (Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM)

1.5. Generación de energía

Una planta de energía geotérmica utiliza el vapor producido de los yacimientos de alta temperatura ubicados en el subsuelo para producir electricidad. El vapor hace girar una turbina que activa un generador eléctrico. Este proceso se ilustra en las siguientes imágenes (Figura: 4, 5, 6) (fuente: Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable de Estados Unidos):

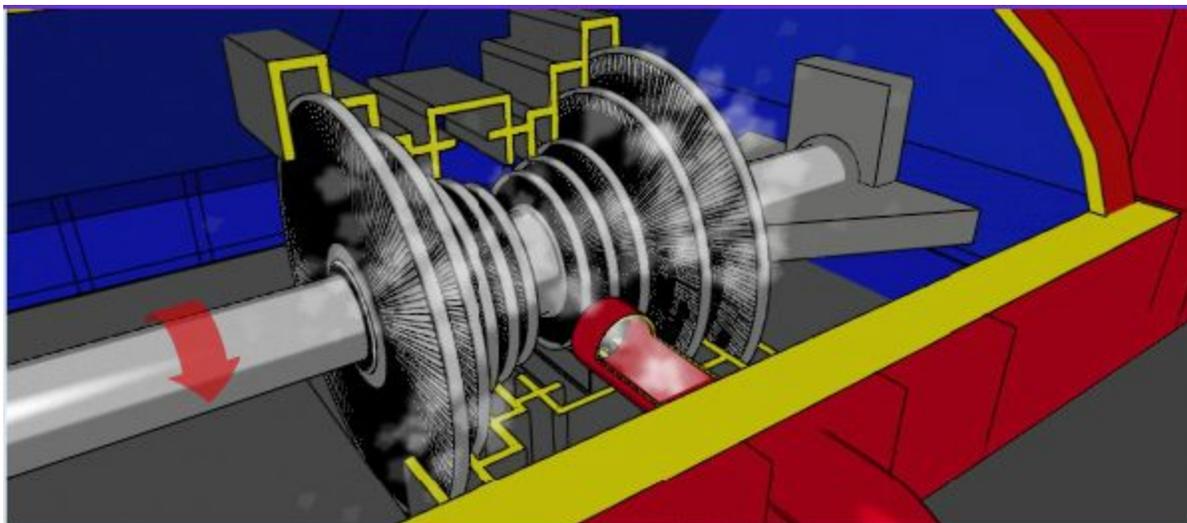


Figura 4: El fluido geotérmico caliente y presionado, o un fluido de trabajo secundario, se expande rápidamente y provee energía rotacional o mecánica que gira los álabes de la turbina. (Recuperado de: <https://www.energy.gov>)

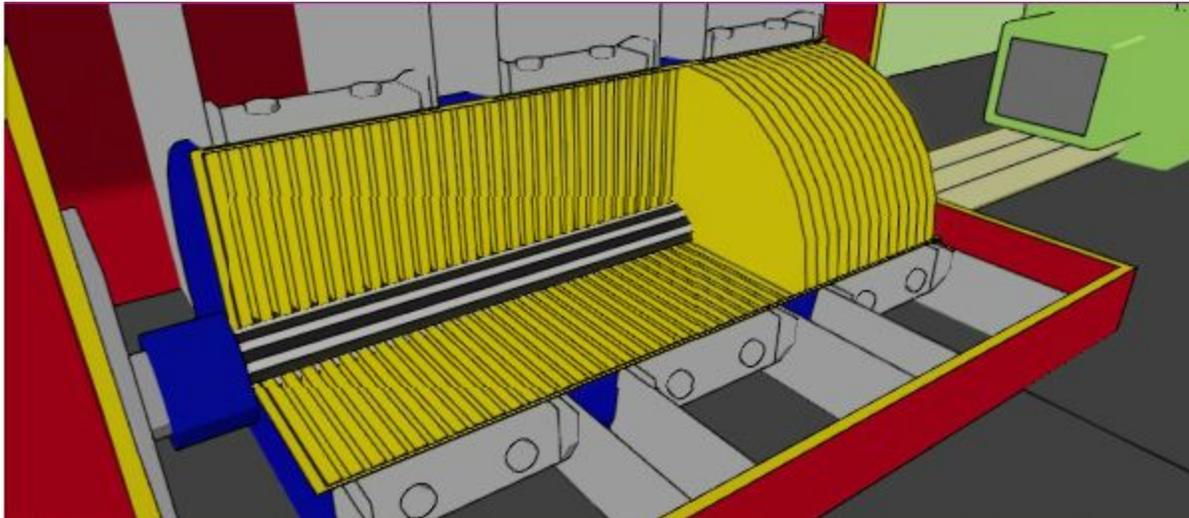


Figura 5: La energía rotacional del eje giratorio de la turbina se usa directamente para girar los imanes dentro de una gran bobina para generar una corriente eléctrica. (Recuperado de: <https://www.energy.gov>)

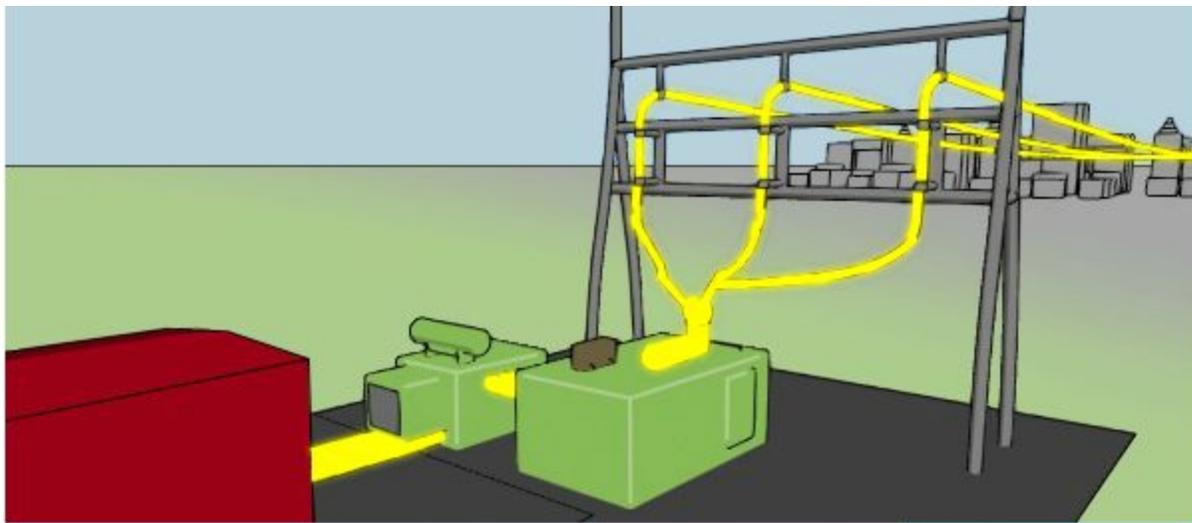


Figura 6: La corriente eléctrica del generador es enviada a un transformador elevador fuera de la planta. El voltaje se incrementa y la corriente eléctrica se transmite por cables eléctricos a su destino. (Recuperado de: <https://www.energy.gov>)

Existen tres tipos de plantas de energía eléctrica:

-Vapor Seco: En ellas, se extrae el vapor subterráneo, que será transportado directamente desde el pozo a la planta de energía, donde es dirigida a una turbina o unidad de generación. Existen solo dos plantas de este tipo en EEUU: The Geysers en el norte de California, y el Parque Nacional Yellowstone en Wyoming. Sin embargo, Yellowstone se encuentra protegido, impidiendo la producción de este recurso.

-Vapor Flash: En este tipo de planta, el más común, se utilizan yacimientos de agua con más de 180 °C. Al subir el agua caliente por el pozo, la caída de presión causa que una parte del agua se convierta en vapor. Este vapor será separado del agua, y utilizado en la generación de energía, y cualquier agua residual y el vapor condensado serán reinyectados al yacimiento.

-Ciclo Binario: Las plantas de ciclo binario usan el calor de yacimientos de menor temperatura (225 °C - 360 °C) para hervir un fluido de trabajo, que se vaporiza en un intercambiador de calor, y después se usa para alimentar un generador. El agua, que nunca entra en contacto directo con el fluido de trabajo, se reinyecta al subsuelo para su recalentamiento.

En la Figura 7 se muestran de manera simplificada las diferencias entre los tres tipos de plantas generadoras y en la Figura 8 se muestra el porcentaje de la energía geotérmica producido por cada tipo de planta en Estados Unidos.

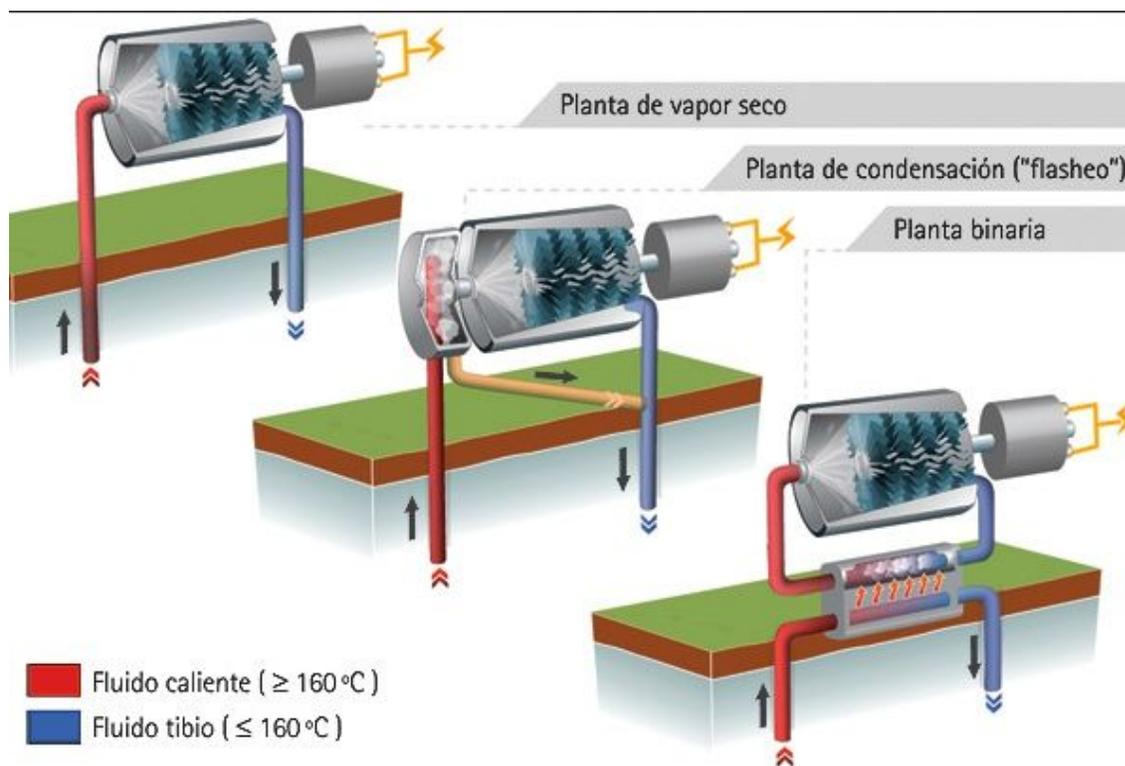
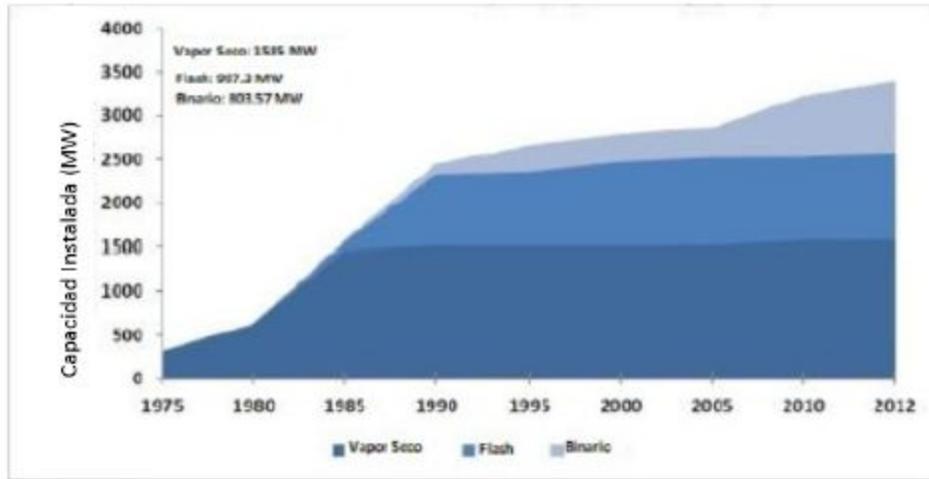


Figura 7: Diferentes tipos de plantas de generación geotérmicas. (Recuperado de: geotermiaonline.com)



Fuente: GEA

Figura 8: Capacidad Geotérmica Instalada en E.E.U.U por tipo de tecnología.
(Fuente: Geothermal Energy Association)

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1. Sismicidad en campos geotérmicos.

Los campos geotérmicos son zonas de interés para su estudio sísmico debido a la cantidad de efectos o fenómenos que la actividad sísmica provoca en estas zonas. Ya sea sismicidad tectónica o inducida, la correlación que hay entre los movimientos telúricos y el comportamiento de un campo geotérmico siempre ha despertado la curiosidad de los científicos alrededor del mundo. Desde un cambio en la sismicidad local, variación en los gastos de producción-inyección, comportamiento anómalo en los sistemas de fallas de la cercanía, o hasta aumento o disminución en la actividad volcánica de la zona, es que se busca develar estas interacciones por lo que se estudia a fondo los campos con equipos especiales llamados sismógrafos.

Es importante usar las herramientas adecuadas para monitorear la sismicidad, para observar con precisión el número de eventos sísmicos asociados con la inyección y lo más importante, su ubicación y magnitud. En particular, es importante registrar eventos de gran magnitud que se ubican cerca de la zona de inyección o aquellos asociados con una falla ubicada en el área de interés. Muchas empresas adoptan un sistema de semáforos donde los eventos sísmicos se clasifican por una serie de umbrales de magnitud. Los eventos de luz verde son eventos más pequeños que se ubican en su zona esperada y no son motivo de preocupación; las operaciones pueden continuar como de costumbre. Los eventos de luz amarilla son eventos de mayor magnitud y/o grupos de eventos que están saliendo de la zona esperada; las operaciones pueden continuar pero las condiciones deberán observarse cuidadosamente y los operadores deben de estar listos para dejar

de operar si las condiciones cambian. Finalmente, los eventos de luz roja exceden los umbrales predeterminados y requieren que se cesen las operaciones de inyección inmediatamente.

Los eventos sísmicos de varias magnitudes presentan diferentes características basadas en su frecuencia de señal. Los eventos microsismicos pequeños emiten ondas sísmicas a frecuencias más altas mientras que eventos de gran magnitud presentan señales de onda más largas a frecuencias mucho más bajas. Al usar varios tipos de sensores afinados para detectar eventos con diferentes frecuencias, los operadores pueden confiar en que la sismicidad se evalúa precisamente.

Todos los sismos que se utilizaron para esta Tesis fueron detectados por un sismógrafo Guralp (Figura 9), los cuales fueron instalados en estaciones formando un red para la óptima localización de los sismos presente en el campo Tres Vírgenes.



Figura 9: Sismógrafo de banda ancha Guralp.

2.1.1. Sismicidad tectónica

Se denomina sismo o terremoto a las sacudidas o movimientos bruscos del terreno producidos en la corteza terrestre como consecuencia de la liberación repentina de energía en el interior de la Tierra o a la tectónica de placas. Esta energía se transmite a la superficie en forma de ondas sísmicas que se propagan en todas las direcciones. El punto en que se origina el terremoto se llama foco o hipocentro; este punto se puede situar a un máximo de unos 700 km hacia el interior terrestre. El epicentro es el punto de la superficie terrestre más próximo al foco del terremoto (Sismos y sismicidad en México, Emilio Rosenblueth). Los componentes de un sismo pueden observarse en la siguiente imagen (Figura 10).

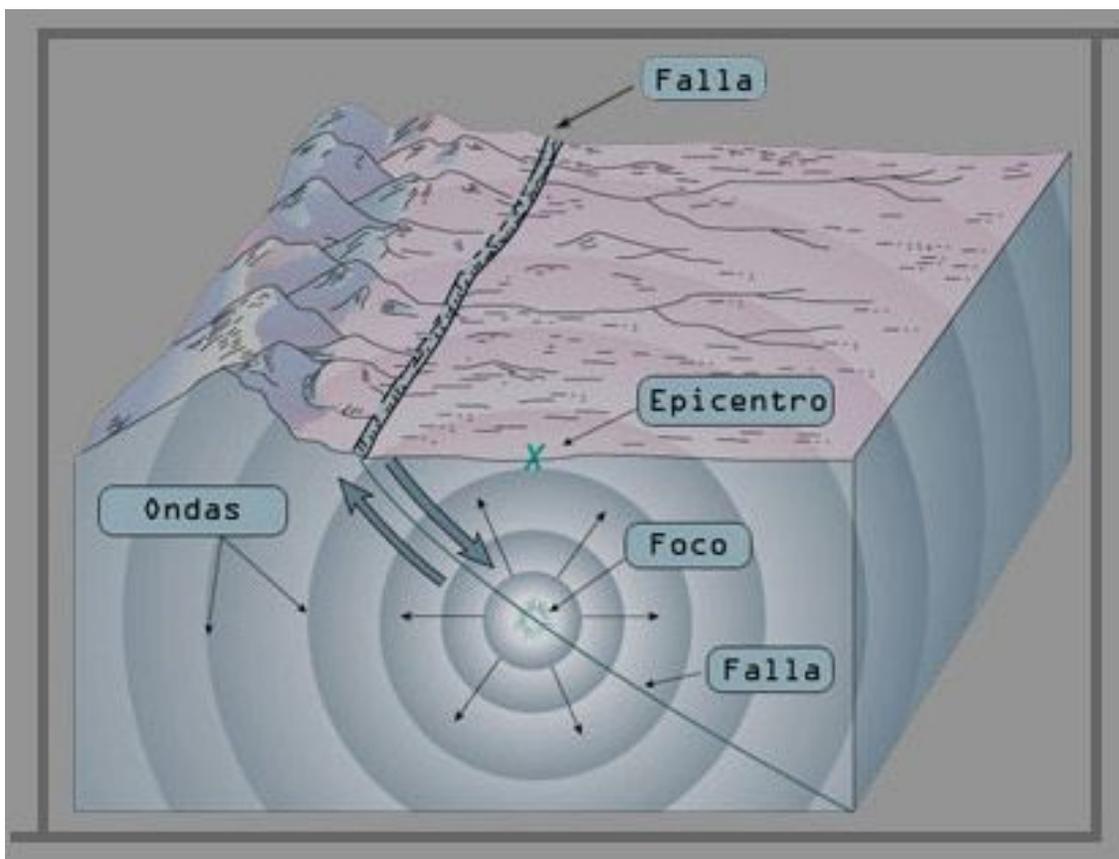


Figura 10: Características de un sismo.

Los sismos se suelen producir en zonas donde la concentración de fuerzas generadas por los límites de las placas tectónicas da lugar a movimientos de reajuste en el interior y en la superficie de la Tierra. Es por esto que los sismos están íntimamente asociados con la formación de fallas geológicas.

2.1.2. Sismicidad inducida

El término de sismicidad inducida empezó a utilizarse a partir de un descubrimiento insólito, siendo el año de 1946, en dicha época el reciente descubrimiento de las bombas atómicas y poder destructivo de las mismas tenía sorprendido al mundo, se realizaban pruebas de este tipo de armamento en islas deshabitadas sin conocer los efectos que a largo plazo tendría, en una de estas pruebas en el atolón de Bikini se notó que las ondas sísmicas creadas por esas explosiones eran capturadas en sismómetros de todo el mundo y los científicos se dieron cuenta de que la sismología podía usarse para monitorear este tipo de pruebas lo que despertó una gran curiosidad sobre cómo el hombre podría generar sismos.

Hoy en día se llama sismicidad inducida a cualquier evento sísmico que resulta de la intervención humana. Hay diferentes maneras en las que la actividad humana pueden causar sismicidad inducida, incluyendo operaciones geotérmicas, represamiento de embalses (agua almacenada en represas), inyecciones de residuos de agua y operaciones de petróleo y gas tales como la fracturación hidráulica.

Cuando se inyectan grandes volúmenes de fluido en formaciones subterráneas para almacenaje o desechos, estos fluidos pueden afectar las presiones que actúan sobre las fallas. La presión de los fluidos en las fracturas y poros de las rocas se denomina "presión de poro". Si las presiones de los poros son bajas en comparación con las fuerzas naturales que mantienen la roca unida, sólo las fuerzas tectónicas naturales podrían causar un terremoto. Sin embargo, si las presiones de los poros aumentan, entonces se necesitaría menos de un desequilibrio de tensiones para causar un terremoto. Existe la posibilidad de que, cuando los fluidos se inyecten en la roca, la presión de poro aumenta en una falla o estructura activa. Esto podría causar un deslizamiento repentino que liberará energía almacenada, generando sismicidad y potencialmente un terremoto.

2.2 Investigaciones previas

A continuación, se presentan varios casos de estudios que sentaron las bases de lo que se plasma en esta Tesis . Estos trabajos de investigación funcionaron como antecedentes para demostrar los objetivos propuestos, además de proporcionar un parámetro de veracidad en los resultados que se obtuvieron en la investigación.

2.2.1 Sismicidad inducida por cambios en el gasto de inyección.

A partir del trabajo realizado por Lermo et. al (2008) titulado "Monitoreo sísmico del campo geotérmico utilizando la red sísmica de Los Humeros (RSHU), se puede obtener una perspectiva de los resultados esperados para esta tesis, ya que se realizó de manera similar un análisis de la sismicidad buscando su relación con los pozos ubicados en la zona.

En esta investigación se localizaron 179 sismos en la zona, los cuales se presentan en conjunto con las fallas y el cuerpo magmático que han sido ubicados en el campo geotérmico. En el perfil oeste-este de la Figura 11: este intrusivo magmático se muestra esquematizado en color rojo, el cual

se encuentra ejerciendo un empuje tectónico hacia arriba, que provoca la activación de por lo menos seis sistemas de fallas activos dentro del campo geotérmico: Loma Blanca, Los Humeros, Las Víboras, Las Papas, La Cuesta y La Antigua. En el perfil se resalta la localización de los sismos inducidos por el pozo inyector H38 con un círculo rojo, así como el trazo del sistema de fallas Los Humeros que muestran dos partes, resaltados con dos elipses grises, la parte sur con gris oscuro y la parte norte con gris claro. El sismo del 16 de agosto del 2015 ($M_w=2.0$), interpretado como un precursor del sismo principal del 8 de febrero del 2016 ($M_w=4.2$) presenta una distribución de sus réplicas hacia el este como lo sugiere el echado del sistema de fallas Los Humeros para esta parte norte (líneas rojas); mientras que las réplicas del sismo principal, presentan una distribución hacia el oeste, como también lo sugiere el echado o buzamiento de la falla mostrada con líneas rojas. Por último las líneas rojas delgadas nos muestran la dirección del posible movimiento de estas fallas.

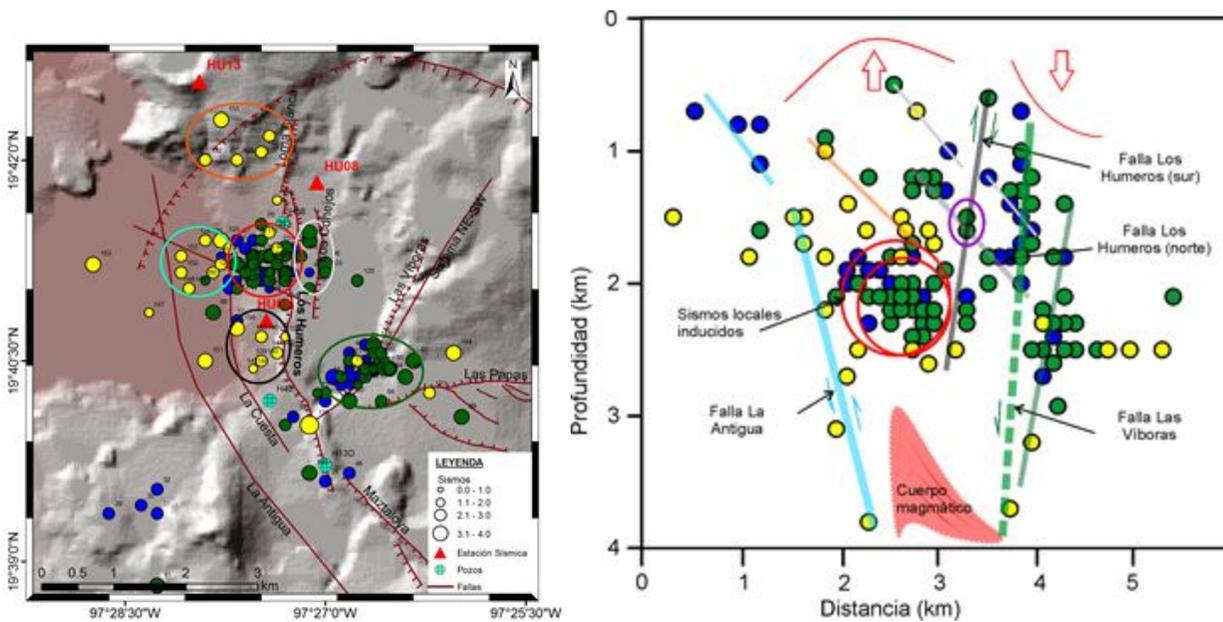


Figura 11: La distribución espacial de los sismos localizados, así como los sistemas de fallas y su relación con el cuerpo magmático presente en el campo.

Después de este análisis, en la Figura 12 se presenta un gráfico que relaciona los gastos de inyección de los pozos a partir del año 2014 con el número de sismos locales registrados en al menos una estación. La influencia de la inyección del líquido al subsuelo se ve reflejada en la actividad sísmica del campo en la siguiente figura. Esta relación existe debido a que la inyección de un fluido a una temperatura diferente a la del sistema en el subsuelo, desestabiliza las estructuras geológicas, que liberan esta energía en forma de sismos. Esto se puede observar en el aumento de sismicidad que se observa en el gráfico cuando existe una variación en la sismicidad con los cambios en el gasto de inyección del pozo H38. Sin embargo, de la gráfica observamos que después de los dos gastos máximos producidos por los pozos inyectores H38 y H40, solo pasaron aproximadamente dos meses para que se iniciara la activación de la falla Los Humeros con el precursor del 16 de agosto del 2015. Aun cuando, no se tenga los gastos para los dos primeros meses del 2016, es importante notar que un gasto de más de 300 ton/hr, provocado el 13 de junio del 2015 por el pozo inyector H38, podría

ser la causante del disparo o reactivación de este sistema de fallas Los Humeros, que ya conocemos su potencial sísmicos desde el 25 de noviembre de 1994 (Lermo et al., 2001).

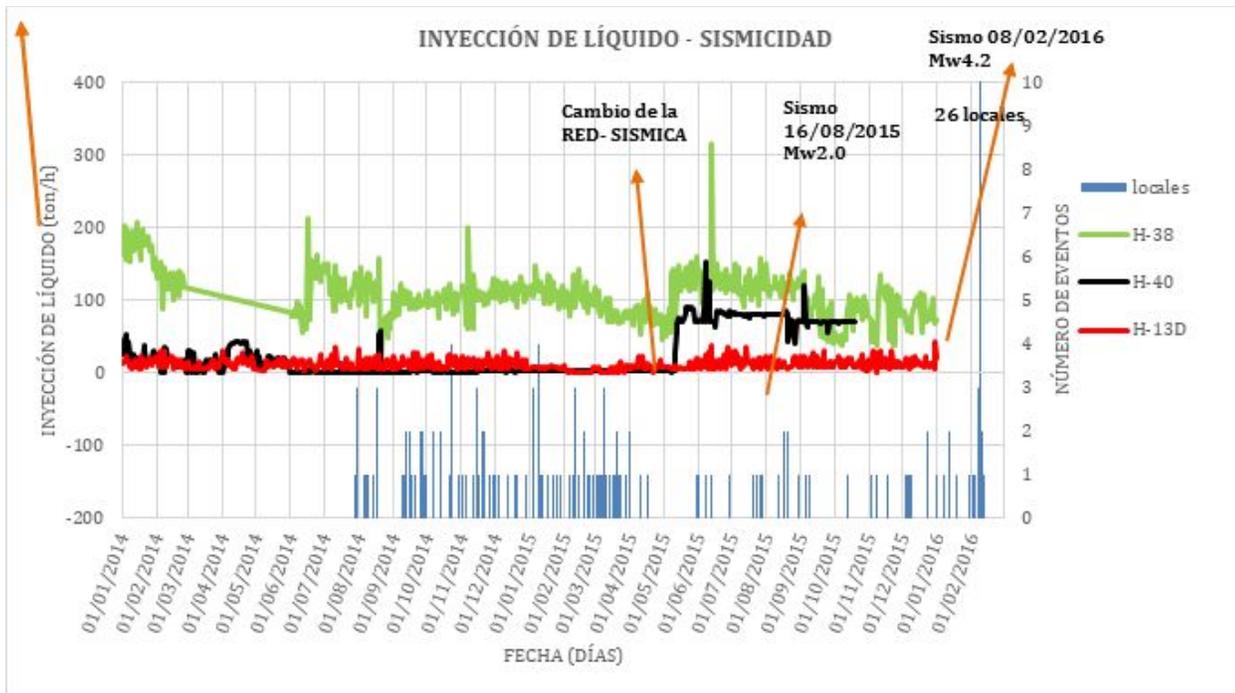


Figura 12: Gráfica que muestra la sismicidad registrada del periodo de julio 2014 a febrero del 2016, con la correlación de la producción de los pozos inyectores H13D, H40 y H38 dentro del campo geotérmico de los Humeros.

El análisis de la relación de los eventos sísmicos locales identificados en la estación HU11 (El Hilillo) desde julio 2014 a diciembre 2015, con los gastos de los pozos inyectores H13D, H38 y H40, confirman que la mayoría de esta sismicidad es inducida o dispara a las fallas que se encuentran activas tanto dentro y fuera del campo.

Esto indica que resulta urgente tomar medidas preventivas para disminuir el impacto de estos sismos grandes que ocurren dentro del campo, y que presentan un aumento en su magnitud, así como en los daños que provoca a la infraestructura del campo geotérmico y a los poblados cercanos a este.

2.2.2 Estadística β , inducción de sismicidad por telesismo.

La estadística β se obtiene con la ecuación utilizada por Castro *et. al* (2017) para comprobar si los cambios en la tasa habitual de sismicidad en un campo geotérmico son significativos, para buscar de esta forma relacionar estos cambios anormales con fuentes externas como los telesismos ocurridos alrededor del mundo, en el caso de su investigación. La tasa normal de sismicidad en la zona se debe obtener de un catálogo de sismicidad completo de la zona. Castro *et. al* utilizó un catálogo de

34 años para la región del Sur de California. La ecuación para el cálculo de la estadística β está descrita por:

$$\beta = \frac{N_i - NT_i/T}{[N(\frac{T_i}{T})(1 - \frac{T_i}{T})]^{1/2}}$$

Donde T_i es la duración del periodo de tiempo de interés y T es la duración del catálogo sísmico completo. N_i y N son el número de eventos en el periodo de interés y el número total de eventos, respectivamente. Para un valor de $|\beta| \geq 1.64$, la diferencia de sismicidad es significativa con una confianza del 90%. Para $|\beta| \geq 1.96$, tendrá una confianza del 95%, y para $|\beta| \geq 2.57$, será de 99%. Por ello, resultará útil encontrar valores altos de β cuando se aplique a un periodo con un cambio de sismicidad visible.

2.2.3. Monitoreo por correlación cruzada de ruido sísmico.

López E, (2017) realizó un trabajo para determinar los efectos de las actividades de la central geotérmica del campo geotérmico Las Tres Vírgenes sobre la velocidad de las ondas sísmicas que se propagan en el medio circundante a este usando el método de la correlación de ruido sísmico. Esto debido a que es posible medir los efectos de una actividad en un campo a partir del estudio de la variación de velocidad de las ondas superficiales por medio de la función de Green empírica obtenida con la correlación de ruido sísmico.

Se considera ruido sísmico a las señales que provienen de un campo difuso (por su paso por las heterogeneidades del medio, que actúan como un punto dispersivo) de ondas generadas por fuentes aleatorias. Aunque se considere ruido, existe información útil que se puede obtener a partir de él.

Este ruido es caracterizarlo en frecuencia y relacionarlo con su posible origen. Los movimientos del suelo por periodos largos (cientos de segundos) se asocian a interacciones entre la tierra y la atmósfera, por periodos de alrededor de 10 segundos se asocian con microsismos, y a periodos de 1 segundo se le asocia a factores ambientales como el viento, lluvia, entre otros. Movimientos menores a 1 segundo son de origen antropogénico.

La correlación cruzada indica el grado de similitud entre dos señales. Si se tiene registro de dos estaciones y se realiza su correlación cruzada, se obtendrá una función que describe el comportamiento entre ambas estaciones, conocida como la función de Green. Esta función puede ser utilizada para detectar pequeñas variaciones de la velocidad en el medio de propagación. En la figura 13 se puede ver el principio.

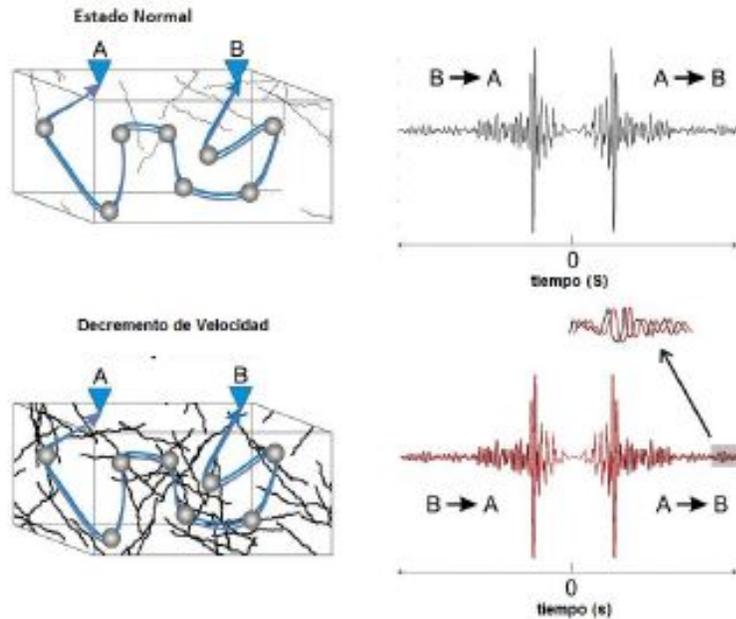


Figura 13: Representación del cambio de velocidad debido a un cambio de estado de esfuerzos mediante funciones de correlación. En la gráfica superior se muestra una función de Green Simétrica, y en la inferior, cuando el medio sufre un cambio en el estado de esfuerzos, la cantidad, ancho y distribución de fracturas puede variar, causando un desfase en el tiempo de arribo del campo de ondas dispersado. (Brenguier, 2016).

CAPÍTULO 3. CONCEPTOS BÁSICOS

3.1. Pozos Geotérmicos

Los pozos geotérmicos se dividen en productores e inyectores. Los primeros son utilizados para extraer el vapor del yacimiento el cual es conducido hasta una turbina para generar electricidad. En cambio los segundos, conducen el agua residual del campo geotérmico para ser devuelta al yacimiento a través de ellos.

Los pozos suelen tener un diseño telescópico porque la perforación se va desarrollando por etapas, en las cuales hay distintos diámetros. En algunos casos se inicia perforando un agujero de 34 pulgadas de diámetro, hasta una profundidad de 100 m. Se corre tubería, se cementa para fijarla al subsuelo y luego se continúa perforando y corriendo tubería de 20 pulgadas y al llegar a la profundidad deseada, se coloca una tubería ranurada de 12 pulgadas de diámetro y es a través de esas ranuras que gracias a la presión del yacimiento se extrae la mezcla de vapor y agua caliente hacia la superficie.

En el proceso de exploración de un campo geotérmico, los pozos que se perforan suelen conocerse como exploratorios, y por otro lado dependiendo de la profundidad de los mismos también se les suele conocer como someros o profundos.

Un pozo de producción geotérmica expulsa líquidos calentados por el calor natural de la tierra. Los fluidos geotérmicos pueden ser de vapor seco o de agua caliente. Los fluidos geotérmicos muy calientes pueden ser utilizados para la generación de energía eléctrica. Los fluidos geotérmicos más fríos se destinan a proyectos tales como la calefacción, la acuicultura, el derretimiento de nieve, la elaboración de alimentos, la deshidratación, las tinas calientes y spas.

En la Figura 14 se ejemplifica un arreglo simple de un pozo productor y uno inyector, y la manera en que interactúan con el yacimiento subterráneo y con la planta generadora.

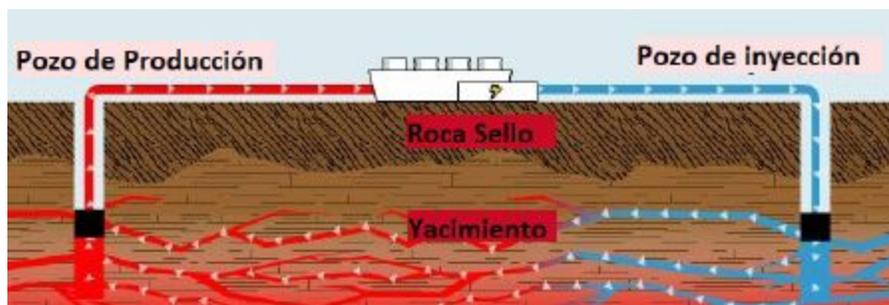


Figura 14: Interacción de los pozos productores e inyectores en un campo geotérmico.

3.1.1. Pozos Exploratorios

Un pozo de exploración. La importancia de este tipo de pozo para la brigada de perforación y los planificadores de pozos radica en que por definición es poco o nada lo que se sabe con certeza sobre la geología del subsuelo, especialmente el régimen de presión. Este grado mayor de incertidumbre necesita que la brigada de perforación cuente con un nivel adecuado de calificación, experiencia y conciencia acerca de lo que los diversos parámetros del pozo le permiten saber sobre las formaciones que perforan. Las brigadas deben operar equipos de excelente calidad, especialmente los preventores de reventón, ya que un golpe de presión puede producirse virtualmente en cualquier momento.

3.1.2. Pozos Productores

Son aquellos que permiten extraer los fluidos de las formaciones productoras, mientras los no Productores (Secos), una vez terminados no producen ni petróleo ni gas en cantidades suficientes como para ser económicamente rentable.

3.1.3. Pozos de Desarrollo

Son aquellos pozos perforados con la finalidad de explotar, extraer y drenar las reservas de un yacimiento. El objetivo principal al perforar un pozo de desarrollo es aumentar la producción del

campo, razón por la cual, se perforan dentro del área probada; sin embargo y debido a la incertidumbre acerca de la forma o el confinamiento de los yacimientos, algunos pozos de desarrollo pueden resultar secos.

3.1.4. Pozo de Avanzada

Después de la perforación de un pozo exploratorio en un área inexplorada que resulta productor, se perforan los pozos de avanzada con el objetivo principal de establecer los límites del yacimiento. Sin embargo, también se perforan pozos de avanzada con el objeto extender el área probada de un yacimiento, si durante el desarrollo de la explotación del mismo se dispone de información que indique que este podría extenderse más allá de los límites originalmente supuestos; entonces se perforan pozos fuera del área probada. Estos tienen mayor riesgo que los pozos de desarrollo, dada su ubicación.

3.1.5. Pozos Inyectores

Son aquellos pozos que permiten inyectar fluidos en las formaciones atravesadas durante la perforación, el fluido inyectado puede ser gas, agua, vapor de agua o productos químicos. El proceso de inyección realiza principalmente con dos objetivos: mantener la presión del yacimiento o para desplazar los fluidos que se encuentran en la formación hacia los pozos productores.

3.4. Métodos de exploración

A continuación se expone el método de exploración utilizado en esta Tesis para llevar a cabo nuestro trabajo de investigación, la sismicidad fue de utilidad para correlacionar los datos recolectados en los campos geotérmicos seleccionados. Es importante mencionar que este método fue el utilizado, aunque esto no quiere decir que sea el único existente para dicho propósito.

3.2.1. Sismicidad

Los métodos sísmicos se dividen en dos tipos: uno es el que se utiliza ampliamente en la industria petrolera, el cual consiste en la inducción de ondas sísmicas en el subsuelo mediante explosivos o vibradores, para medir el tiempo que tarda la onda en ser reflejada a un receptor para conseguir información de la estructura del subsuelo.

Este método no se ha aplicado mucho en prospección geotérmica debido a que los ambientes volcánicos no presentan una estructura reflectora bien definida.

El otro método, que se emplea en geotermia es el llamado sismicidad pasiva, el cual consiste en el registro de la sismicidad natural del terreno.

Las ondas sísmicas se dividen en dos grupos: las superficiales y las que viajan por la masa de rocas. Para geotermia, resultan útiles las ondas que viajan por la roca. Estas ondas se dividen, a su vez, en:

-Ondas Primarias (P): La primera característica de esta onda es que comprime y expande la roca, en forma alternada en la misma dirección en que viaja. Estas ondas son capaces de viajar a través de las rocas sólidas así como de líquidos, por ejemplo océanos o magma volcánico. Además, las ondas "P" son capaces de transmitirse a través de la atmósfera, por lo que en ocasiones son percibidas por personas y animales como un sonido grave y profundo. Son ondas compresivas, en las que el movimiento oscilatorio de las partículas es en la misma dirección que la propagación de la onda.

-Ondas Secundarias (S): Viajan más lento que las ondas P, por lo que arriban con posterioridad a la superficie terrestre. Ocurren de manera perpendicular a la dirección de propagación de la onda, por lo que sacuden la superficie del suelo vertical y horizontalmente.. Este es el movimiento responsable del daño de las construcciones. Las ondas S no pueden propagarse en fluidos

-Ondas Love (L): Su movimiento es el mismo que el de las Ondas S, sólo que restringido a los intervalos de interacción entre las diferentes capas de la superficie terrestre. Viajan más rápido que las Ondas Rayleigh.

-Ondas Rayleigh (R): Tienen un movimiento vertical similar al de las olas de mar. Las ondas superficiales viajan más despacio que las ondas internas.

El comportamiento de cada tipo de onda se puede observar en la Figura 15.

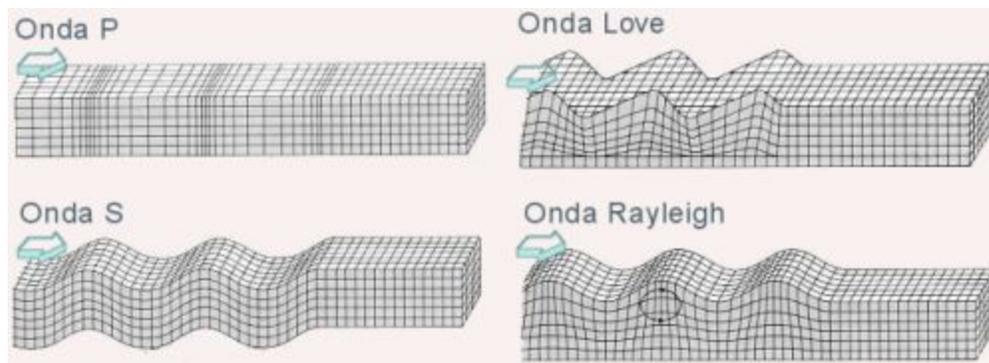


Figura 15: Comportamiento de los diferentes tipos de onda.

La velocidad a la que se propaga la onda sísmica depende de las propiedades mecánicas de la roca como compresibilidad o densidad.

La sismicidad se registra mediante sismómetros y sismógrafos. Los equipos más utilizados son los de tres componentes (x, y, z); estos miden la velocidad del movimiento del terreno o la aceleración.

En los estudios de microsismicidad, se necesita instalar una red local con, por lo menos, seis estaciones. Para ubicar un sismo de manera precisa, debe registrarse en tres estaciones, por lo

menos, estando el epicentro dentro del perímetro cubierto por la red. Si se posee suficiente información de calidad, es posible interpretar el mecanismo focal que causó el sismo y así calcular la geometría del plano de falla, con base en la distribución de la dirección de llegada de las ondas P a la superficie. La intensidad de los sismos se mide en escalas de intensidad y de magnitud.

Si se cuenta con un historial de microsismos, es posible obtener un modelo tridimensional detallado de distribución de velocidad de propagación de las ondas en las rocas. A su vez, este modelo debe guardar relación con la estructura geométrica del subsuelo y las propiedades físicas de las rocas. A esto se le conoce como tomografía sísmica, y permite conocer mejor la estructura tridimensional de un yacimiento, o incluso determinar los cambios producidos por la explotación.

La única desventaja del procedimiento es la necesidad de registrar un gran número de sismos con registros de alta calidad. Esto requiere que se necesite una medición de más de dos años, lo que puede resultar impráctico para programas de explotación.

De acuerdo con la diferencia de tiempo entre los arribos de sus ondas P y S, los sismos pueden clasificarse en:

- Sismos locales son aquellos cuya duración del arribo de la onda P es igual o menor a cuatro segundos.
- Sismos regionales son aquellos cuya duración de la onda P oscila entre los 4 y 16 segundos
- Sismos distantes o telesismos, son aquellos cuya duración de la onda P es mayor a los 16 segundos.

3.3. Diagrama solución de un mecanismo focal.

Una solución de mecanismo focal (SMF) es el resultado de un análisis de formas de onda generadas por un terremoto y registrado por al menos diez sismógrafos, con estaciones bien distribuidas geográficamente alrededor del epicentro. Ésta caracterización completa del mecanismo focal de un terremoto provee información importante, como el tiempo de origen, la ubicación del epicentro, profundidad focal, momento sísmico (una medida directa de la energía irradiada por un terremoto), y la magnitud y orientación espacial de los 9 componentes del tensor de momentos. Además, permite resolver la orientación y el sentido de deslizamiento de la falla.

Interpretación de diagramas de “pelota de playa” de una SMF.

Los diagramas de pelota de playa son proyecciones estereográficas que muestran dos cuadrantes negros y dos cuadrantes blancos separados por grandes arcos de círculo orientados a 90° de cada uno. Los arcos son los planos nodales, uno de los cuales coincide con la superficie de falla que generó el terremoto. El rumbo de una falla se indica por una línea que conecta los dos puntos en los que el gran círculo correspondiente a la falla interseca con el borde exterior del diagrama de pelota de playa (véase Figura 16).

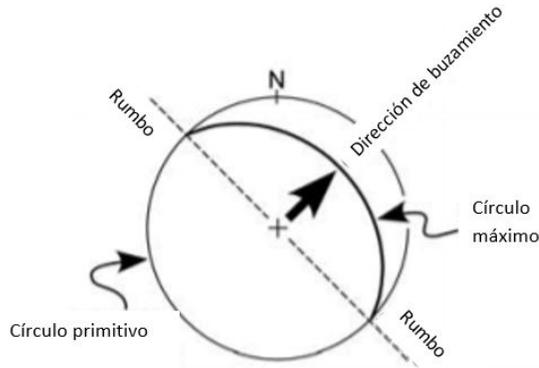


Figura 16: Partes de un diagrama de pelota.

Una falla de rumbo (strike-slip fault) resulta en diagramas con un patrón característico en forma de cruz. El movimiento de la onda P por el material alrededor del foco causa que las partículas en los cuadrantes negros se alejen del foco, mientras que las partículas de los cuadrantes blancos son atraídas hacia el foco. Debido a su forma, se requiere información de campo para diferenciar la dirección desde la que se da el deslizamiento en las fallas (c o d en la figura 17).

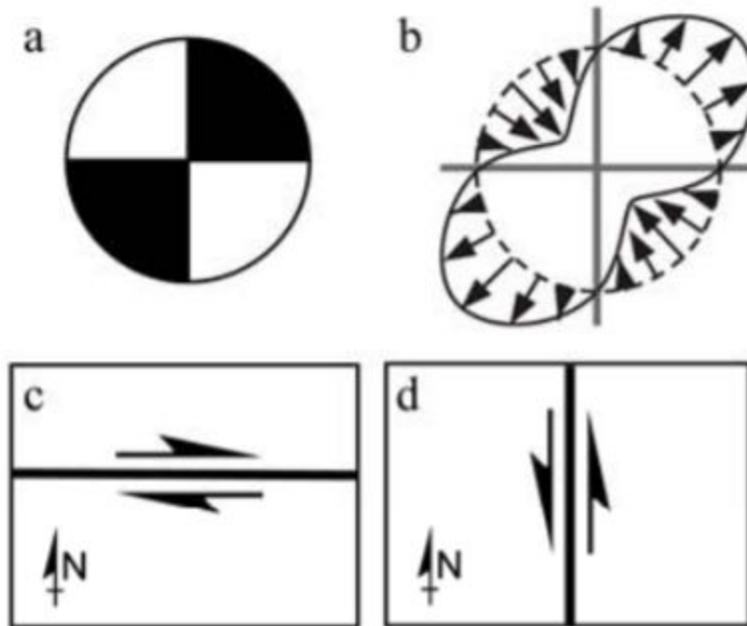


Figura 17. Diagrama característico de una falla de rumbo. El caso c indica un deslizamiento lateral derecho a través de una falla este-oeste. El caso d indica un deslizamiento lateral izquierdo por una falla norte-sur.

Una falla de echado incluye fallas normales e inversas. En ellos sólo tres de los cuatro cuadrantes son observables en el diagrama. El centro del diagrama es blanco para mecanismos de falla normal (a), y el centro es negro para mecanismos de falla inversa (b). (Figura 18)

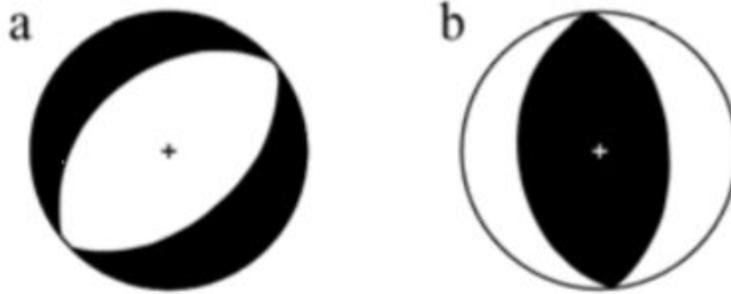


Figura 18: Diagramas obtenidos por fallas de echado (dip-slip faults).

Las fallas oblicuas muestran los cuatro cuadrantes. Si el centro del diagrama está en un cuadrante blanco (a), la falla tiene una componente normal de deslizamiento (a); si el centro está en un cuadrante negro, la falla tiene una componente inversa de deslizamiento (b) (Figura 19).

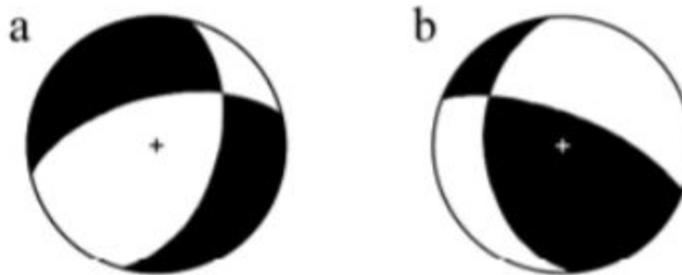


Figura 19: Diagrama obtenido por fallas oblicuas.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1. Procesado de datos sísmicos y localización de eventos de interés.

Para el objetivo de tesis, fue necesario utilizar datos sísmicos de la zona que, al ser procesados, nos permiten localizar los sismos, así como calcular la profundidad e intensidad de los eventos locales registrados en los campos geotérmicos seleccionados para analizar en este trabajo. Dicha información y datos resultantes son obtenidos a partir de la siguiente metodología y con el uso de diversos programas que facilitan el procesado de datos.

PASO 1. PROCESADO DE LA INFORMACIÓN

Dentro del campo geotérmico se encuentra una red de sismógrafos (Figura 21) que registra la información del campo las 24 horas del día; esta información se recopila de manera regular y con el fin de tener un control, se realiza un calendario mensual (Figura 20) de las estaciones que estuvieron en funcionamiento.

ESTACIÓN	ENERO 2016 MES 01 JULIANO: 001-031																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
TV01 RESIDENCIA DM24-8897/CMG40T-T4Q74 (UNAM-2Gb)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TV03 KB DM24-A757/CMG40T-T4S27 (UNAM)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X
TV04 CUEVA EAM-A2494/CMG40T-T4291 (UNAM)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TV05 SAN JORGE 6TD-T6R07/C3640(UNAM-16Gb)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TV11 AZUFRE 6TD-T6J78 (AMPERE)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TV18 CARDON 6TD-TQ86/C3639 (UNAM-8Gb)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O					
TV23 JOJOBA 6TD-T6J34 (UNAM-8Gb)																										O	X	X	O		
TV26 UMA 6TD-T6N77/C3643 (UNAM-8Gb)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TV22 MEZQUITAL 6TD-T6689 (UNAM)																											O	O	O	X	X
TV27 TELMEX 6TD-T6R21/C3641 (UNAM-8Gb)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O	X	X	X
TV28 BEBEDERO 6TD-T6R27/C3642 (UNAM-8Gb)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figura 20: Bitácora mensual de las estaciones en funcionamiento X=registro completo, O=registro incompleto, □=sin registro.

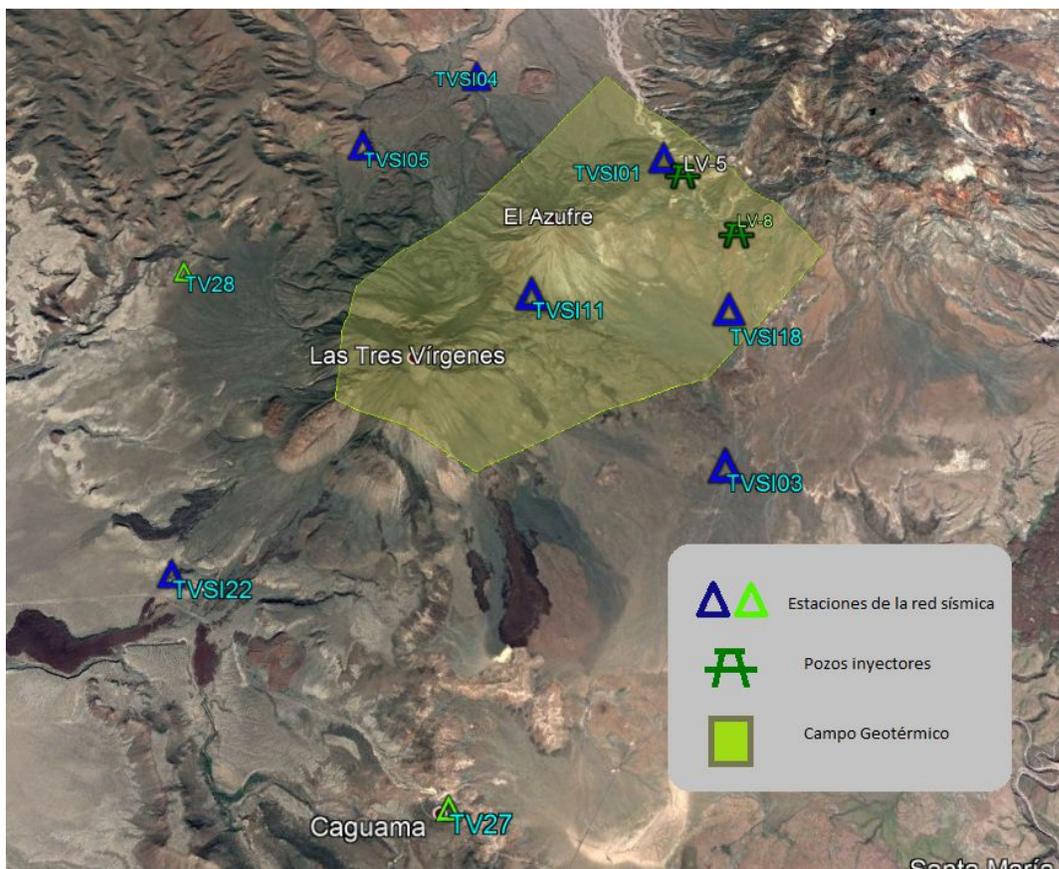
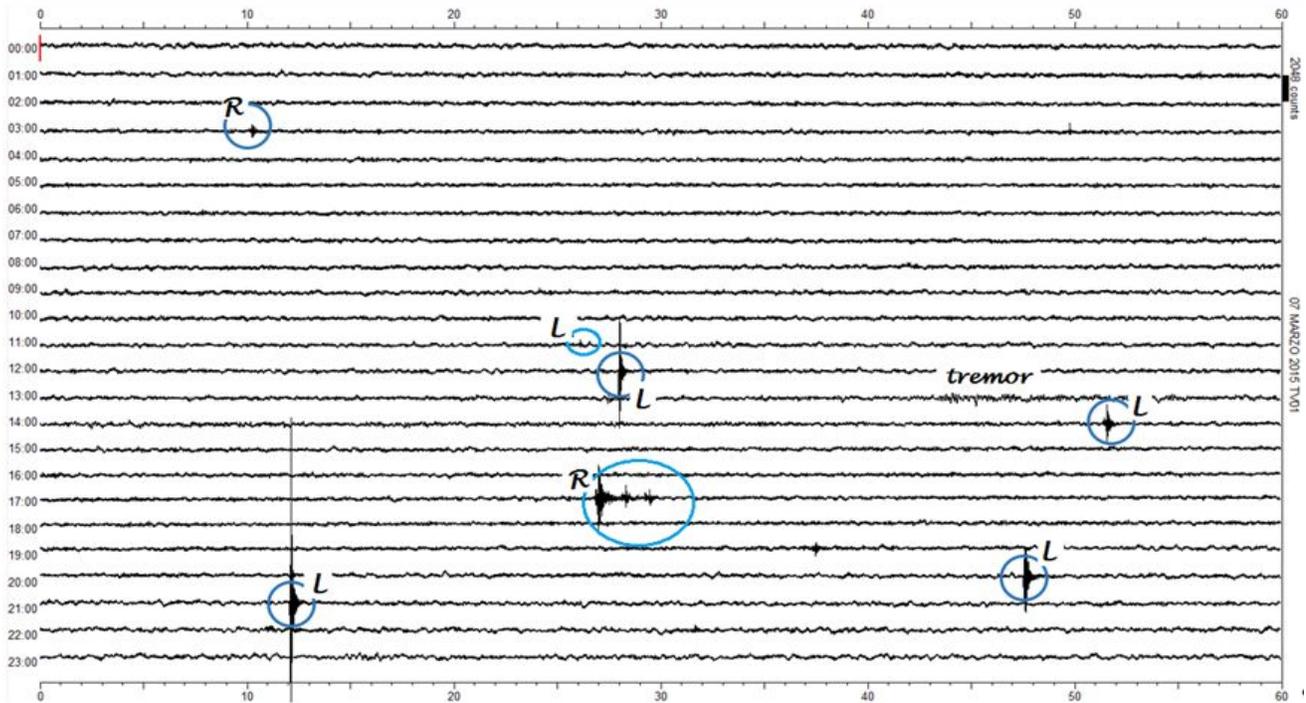


Figura 21: Distribución espacial de la red sísmica en el campo geotérmico de Tres Virgenes .

PASO 2: TAMBORES SÍSMICOS

Cada sismógrafo registra en sus tres componentes Norte-Sur, Este-Oeste y la componente vertical, para identificar los eventos sísmico se utiliza la información de la componente z de la estación base (estación en la cual se presente menos ruido), se genera un tambor sísmico (Figura 22) con el programa Drumplot, en el cual se observa la señal de un día completo registrada.



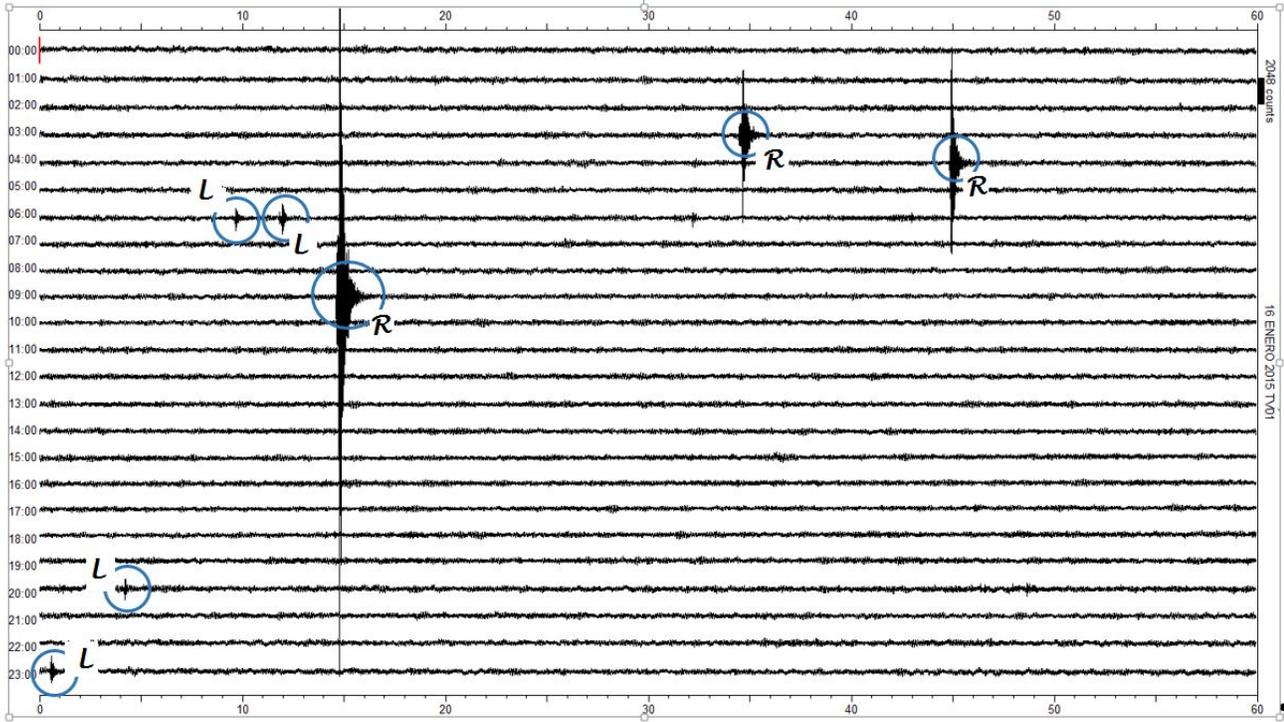


Figura 22: Arriba: tambor del 15 de Enero de 2015, abajo: tambor del 03 de marzo de 2015; círculos R, eventos regionales y círculos L, eventos locales.

Utilizando el programa Scream, el cual nos permite visualizar la señal de la componente z de la estación base, se realiza una clasificación de los eventos sísmicos: locales (S-P de 0 a 4 seg), regionales (P-S de 4-16 seg) y distantes (mayores a 16 seg). En la Figura 23 se puede observar un evento sísmico regional así como su espectro.

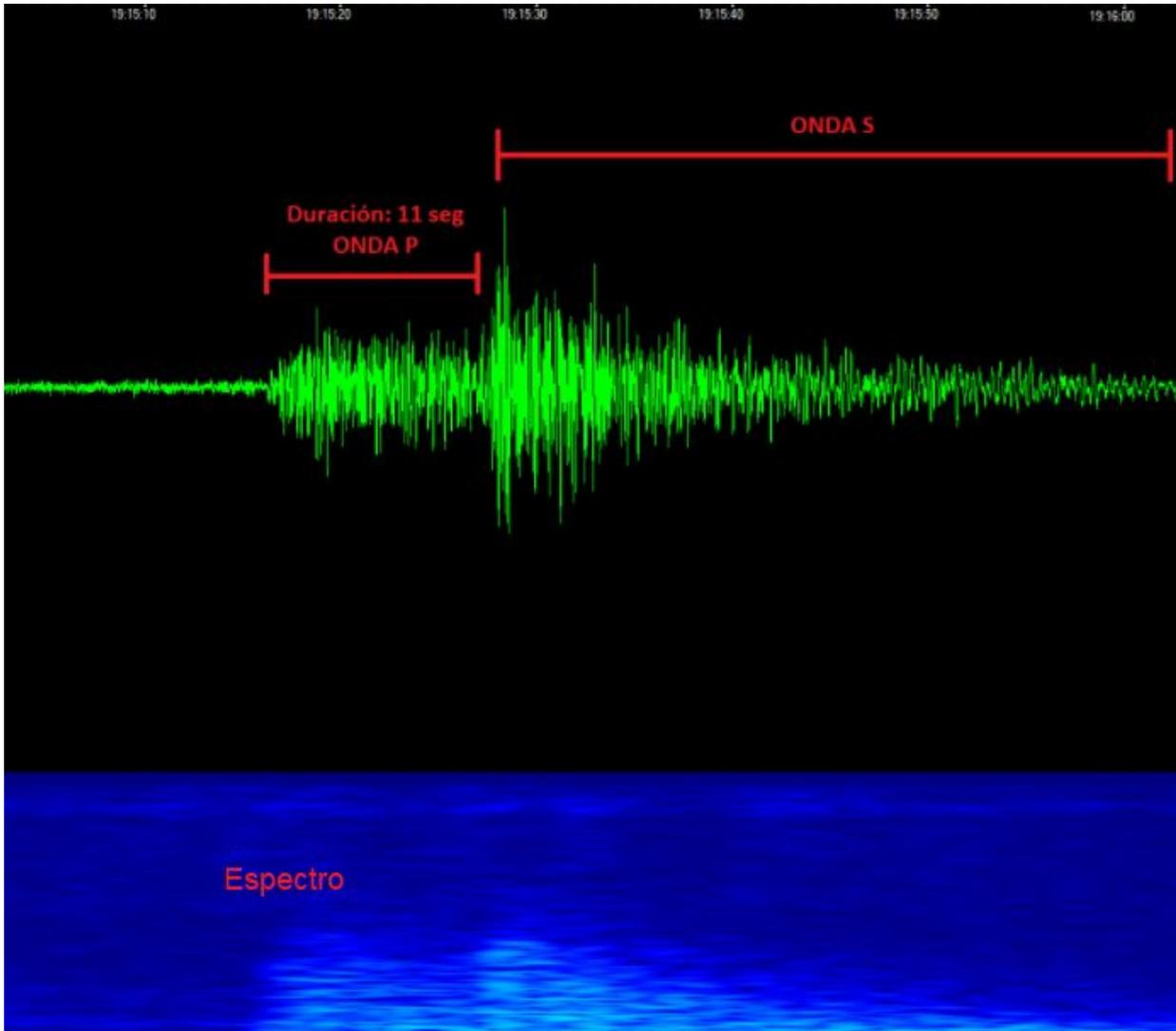


Figura 23: Evento sísmico lejano.

Una vez que se analizó la información, y se localizaron los eventos locales, se verifica que este evento se haya registrado en más de tres estaciones (figura 24), esto con el fin de que la localización sea confiable. Entre más estaciones detecten el evento, más precisa podrá ser su localización.

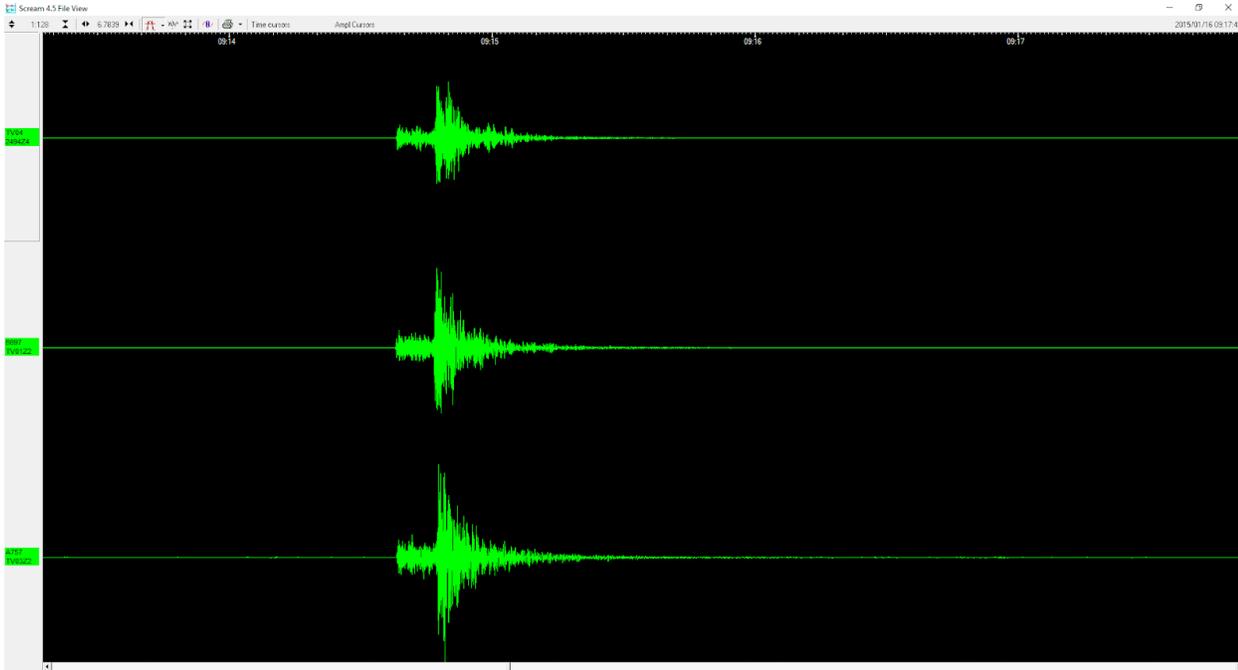


Figura 24: Evento sísmico detectado en tres estaciones distintas.

PASO 3: RECORTE DE SISMOS.

Una vez identificados los eventos sísmicos locales, se pasa la información de todas las estaciones y sus tres componentes a formato SEISAN, el cual nos permite realizar el picado de los arribos de las S y P.

En la figura 25 se muestra un evento local registrado en 8 estaciones; aunque exista cierto error de tiempo en el registro, es evidente que el evento es el mismo.

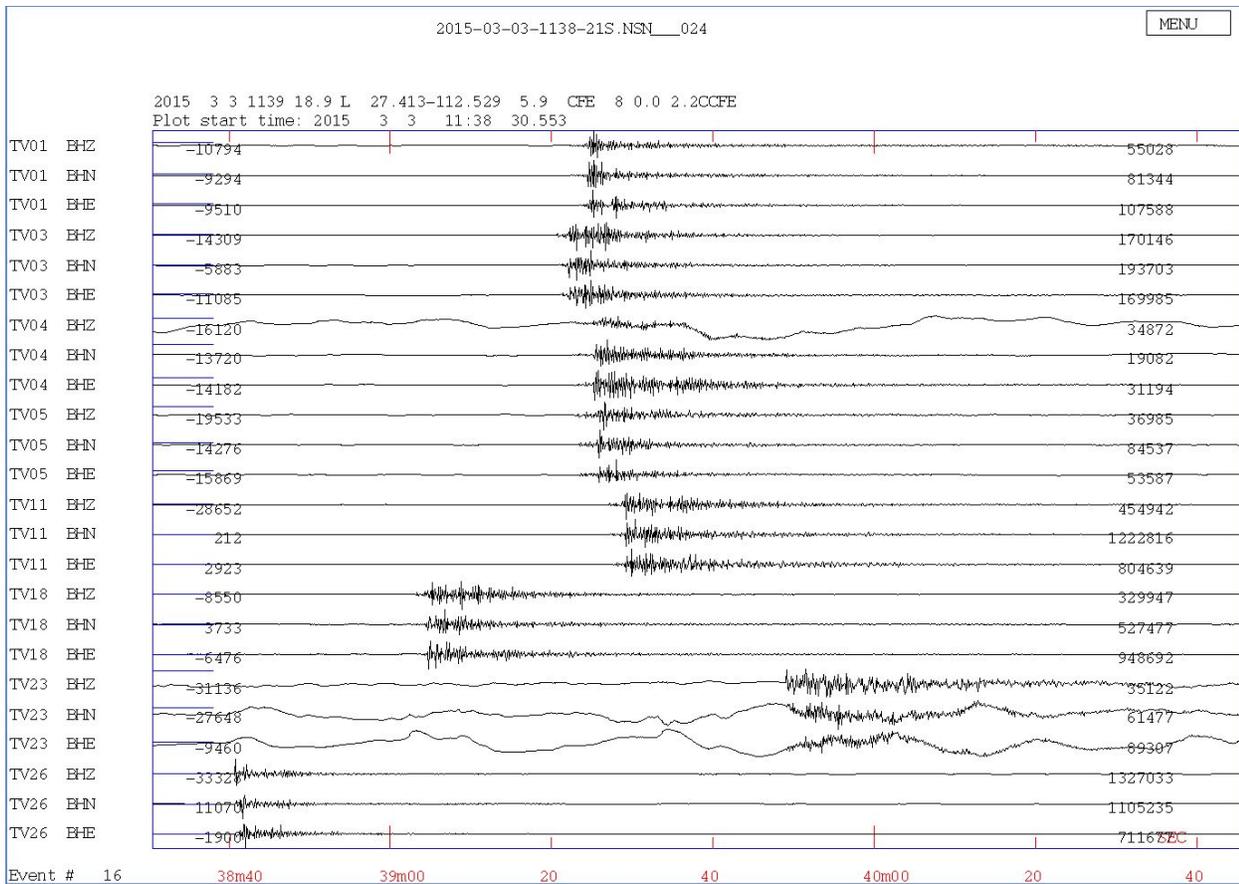


Figura 25: Evento sísmico del 03 de Marzo de 2015 registrado en 8 estaciones.

PASO 3: PICADO DE LAS ONDAS S Y P.

Una vez cortados los eventos sísmicos locales se realiza el picado de los arribos tanto de la onda P y S. Dentro del arribo de la onda P, se identifica si dicho arribo es compresional (C) o de dilatación (D). En la Figura 26 se puede observar cómo luce el picado de las ondas.

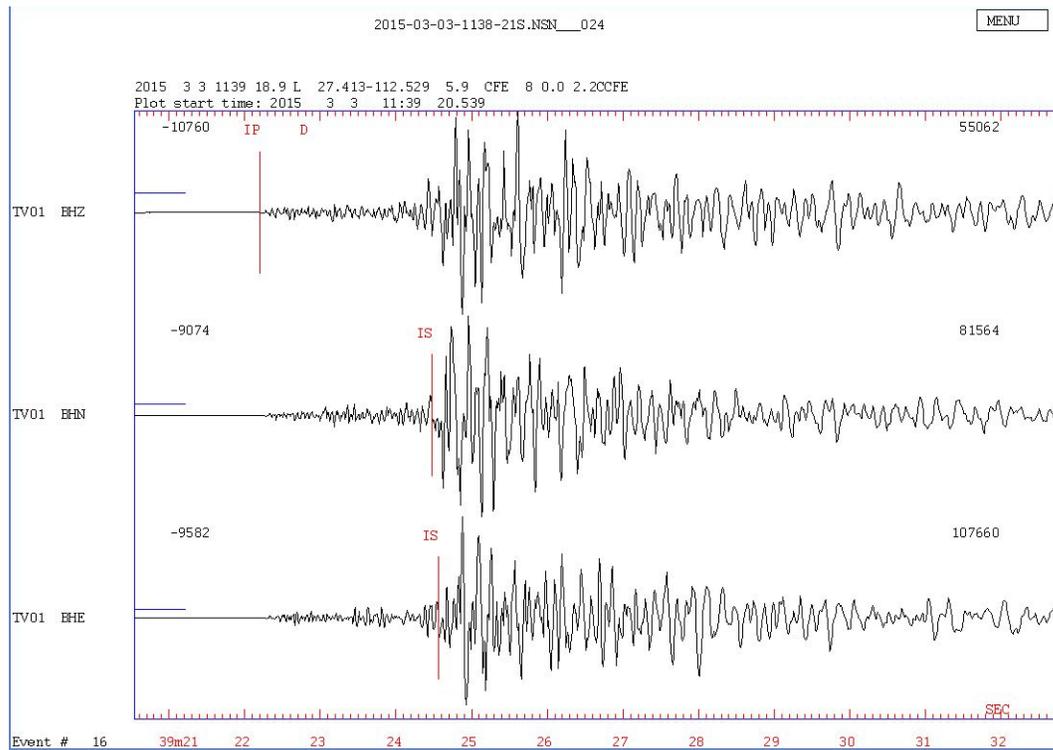
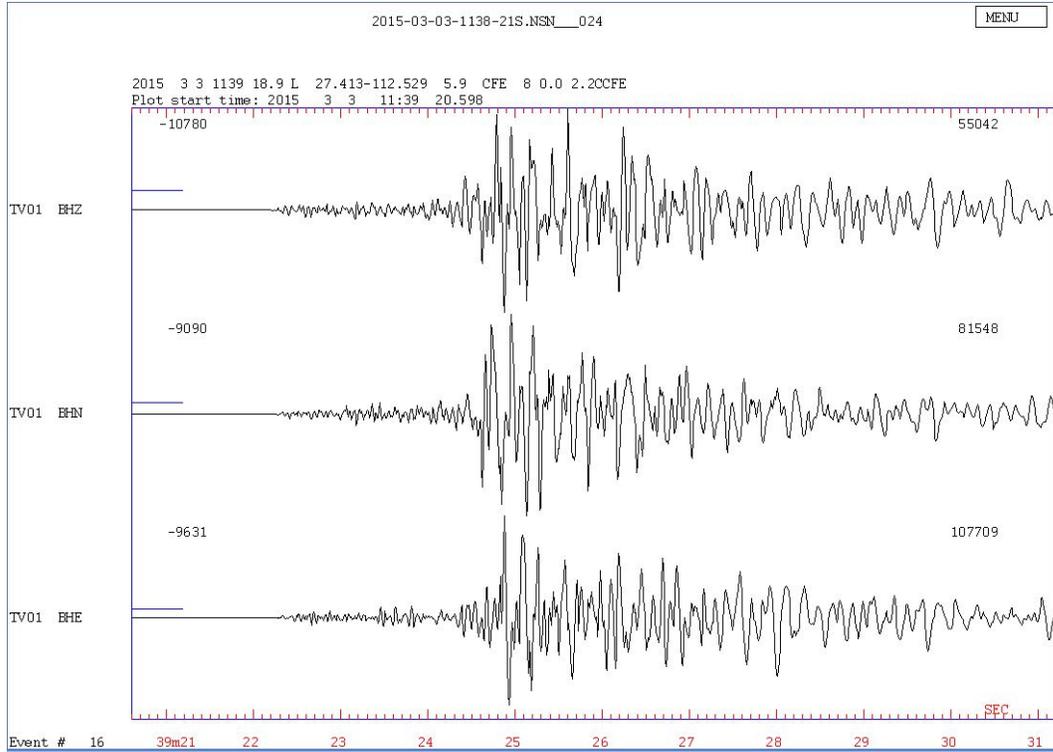


Figura 26: Señal de las tres componentes de un evento sísmico localizado en una estación, arriba: evento sin picado de la onda S y P, abajo: evento picado.

PASO 4: LOCALIZACIÓN DE UN EVENTO SÍSMICO.

Después de realizar los picados de cada estación, el programa SEISAN nos arroja el epicentro del evento así como su magnitud, profundidad, entre otros parámetros (Figura 27).

date	hrmn	sec	lat	long	depth	no	m	rms	damp	erln	erlt	erdp	
171217	10 3	27.98	2050.50N 103	28.0W	4.7	17	3	0.51	0.000	13.2	4.8	0.8	
stn	dist	azm	ain	w	phas	calcphs	hrmn	tsec	t-obs	t-cal	res	wt	di
SL02	11	15.9	91.2	0	S	S -P			2.0	2.4	-0.37	1.00	9
SL02	11	15.9			S		10 3	28.0	2.0				
SL02	11	15.9	91.2	9	P	9 C PG	10 3	27.5	-0.46	3.25	-3.70	0.00	0
SL01	13	15.8	91.0	0	P	C PG	10 3	32.1	4.10	3.71	0.39	1.00	7
SL01	13	15.8	91.0	0	S	SG	10 3	34.1	6.16	6.42	-0.26	1.00	9
SL01	13	15.8			S		10 3	34.2	6.2				
SL07	14	37.5	90.9	0	P	PG	10 3	31.6	3.63	3.48	0.15	1.00	3
SL07	14	37.5	90.9	0	S	SG	10 3	33.8	5.79	6.02	-0.23	1.00	12
SL07	14	37.5			S		10 3	33.9	5.9				
SL05	14	32.0	90.9	0	S	S -P			1.8	2.5	-0.70	1.00	7
SL05	14	32.0			S		10 3	33.9	1.8				
SL05	14	32.0	90.9	9	P	9 PG	10 3	35.3	7.27	3.48	3.80	0.00	0
B897	15	28.1	90.8	0	S	SG	10 3	34.1	6.13	6.18	-0.04	1.00	3
B897	15	28.1	90.8	0	S	SG	10 3	34.0	6.05	6.18	-0.12	1.00	3
B897	15	28.1	90.8	0	P	C PG	10 3	32.0	4.02	3.57	0.45	1.00	4
SL13	15	1.3	90.8	0	S	S -P			2.6	2.9	-0.35	1.00	7
SL13	15	1.3			S		10 3	32.0	2.7				
SL13	15	1.3	90.8	9	P	9 PG	10 3	32.3	4.36	4.02	0.34	0.00	0
Return to continue, q to end listing													
SL04	18	16.2	90.7	9	P	9 C PG	10 4	44.9	76.91	4.08	72.83	0.00	0
SL04	18	16.2	90.7	0	S	S -P			2.9	3.0	-0.11	1.00	2
SL04	18	16.2			S		10 4	44.9	2.9				
SL09	20	22.2	90.6	0	S	S -P			2.6	2.9	-0.38	1.00	2
SL09	20	22.2			S		10 4	44.9	2.6				
SL09	20	22.2	90.6	9	P	9 C PG	10 3	33.0	4.99	4.01	0.98	0.00	0
SL11	21	0.5	90.6	9	P	9 D PG	10 3	30.7	2.76	4.51	-1.75	0.00	0
SL11	21	0.5	90.6	0	S	S -P			2.9	3.3	-0.38	1.00	5
SL11	21	0.5			S		10 3	30.7	2.9				
PR02	22	193.3	90.5	0	S	SG	10 3	36.3	8.34	9.04	-0.70	1.00	11
PR02	22	193.3	90.5	0	P	PG	10 3	34.2	6.26	5.23	1.04	1.00	5
PR02	22	193.3	90.5	0	S	SG	10 3	36.3	8.35	9.04	-0.69	1.00	11
SL10	23	10.4	90.5	9	P	9 C PG	10 3	33.5	5.48	4.47	1.01	0.00	0
SL10	23	10.4			S		10 3	33.5	3.4				
SL10	23	10.4	90.5	0	S	S -P			3.3	3.3	0.04	1.00	2
SL07 BZ	hdist:		14.4	coda:		50.0			mc =	2.5			
SL01 BZ	hdist:		13.9	coda:		47.0			mc =	2.4			
SL04 BZ	hdist:		18.5	coda:		68.0			mc =	2.8			
SL11 BZ	hdist:		21.4	coda:		62.0			mc =	2.7			
PR02 BZ	hdist:		22.6	coda:		50.0			mc =	2.5			
SL10 BZ	hdist:		23.4	coda:		54.0			mc =	2.6			
SL05 BZ	hdist:		14.9	coda:		47.0			mc =	2.4			
SL09 BZ	hdist:		20.2	coda:		34.0			mc =	2.1			
SL13 BZ	hdist:		15.7	coda:		44.0			mc =	2.4			
SL02 BZ	hdist:		11.7	coda:		23.0			mc =	1.7			
B897 BZ	hdist:		15.6	coda:		56.0			mc =	2.6			

Figura 27:Tabla de indicadores de un evento sísmico.

Una vez que se realizaron todos los pasos anteriores, se puede exportar esta información al formato gmap, el cual nos mostrará en un mapa topográfico de Google® el epicentro del sismo localizado y la distancia que tiene respecto a las estaciones de banda ancha que lo detectaron así como se muestra en la Figura 28. Los triángulos azules representan las estaciones que detectaron el evento sísmico representado con el punto rojo. Además, resultado del resto de estudios realizados por el equipo del Instituto de Ingeniería, se posee la ubicación geográfica de las fallas existentes en los campos estudiados, como se puede ver en el mapa de la Figura 29.

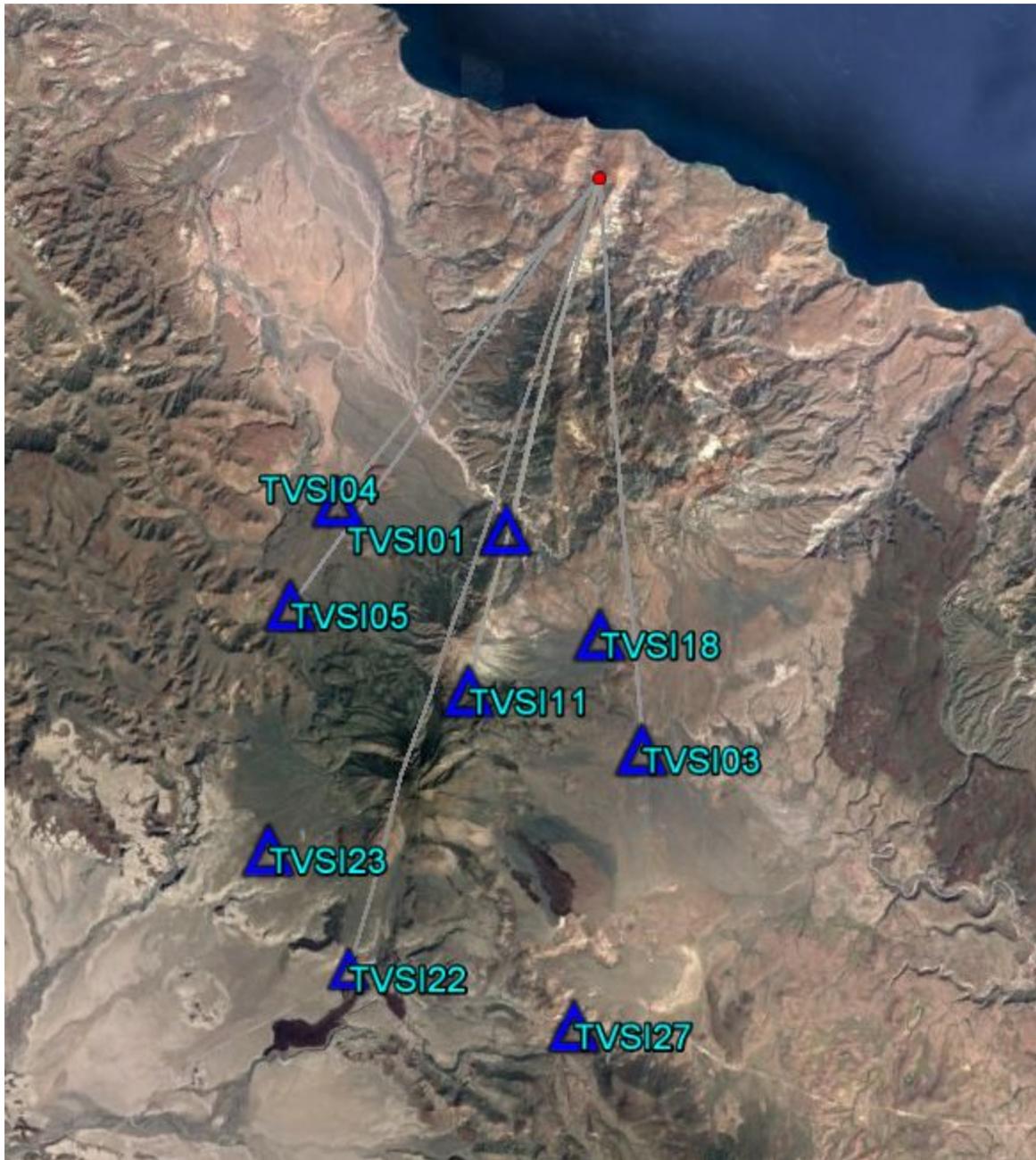


Figura 28: Locación de un evento sísmico en SEISAN.

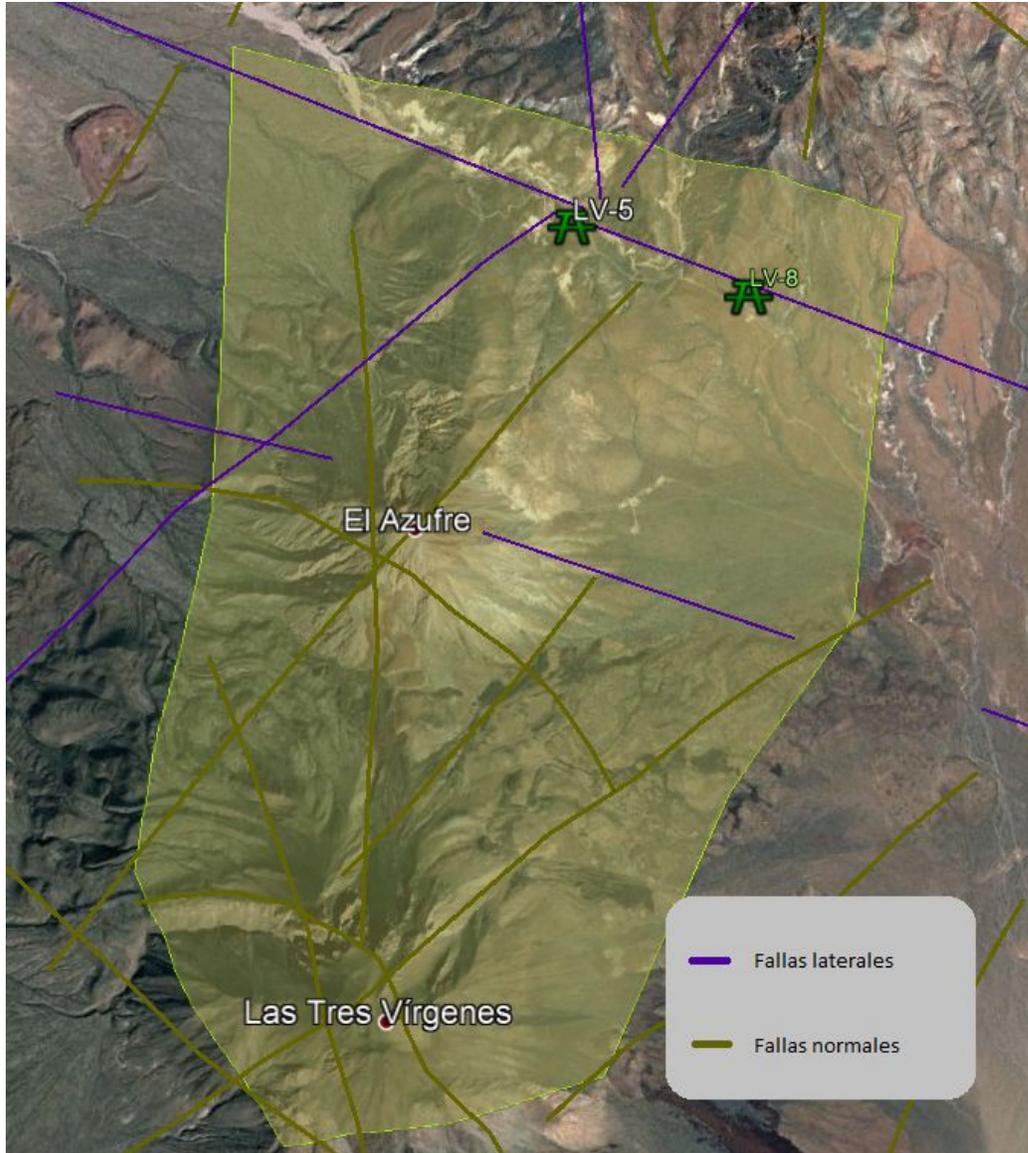


Figura 29: Mapa de fallas presentes en el campo.

PASO 5: OBTENCIÓN DE MECANISMOS FOCALES

Una vez localizados los eventos sísmicos en la zona de interés, se observa la distribución espacial de estos para ver si hay acumulaciones de eventos, en caso de encontrar una acumulación o acumulaciones se procede a sobreponer los sistemas de fallas que se encuentran en la zona de estudio.

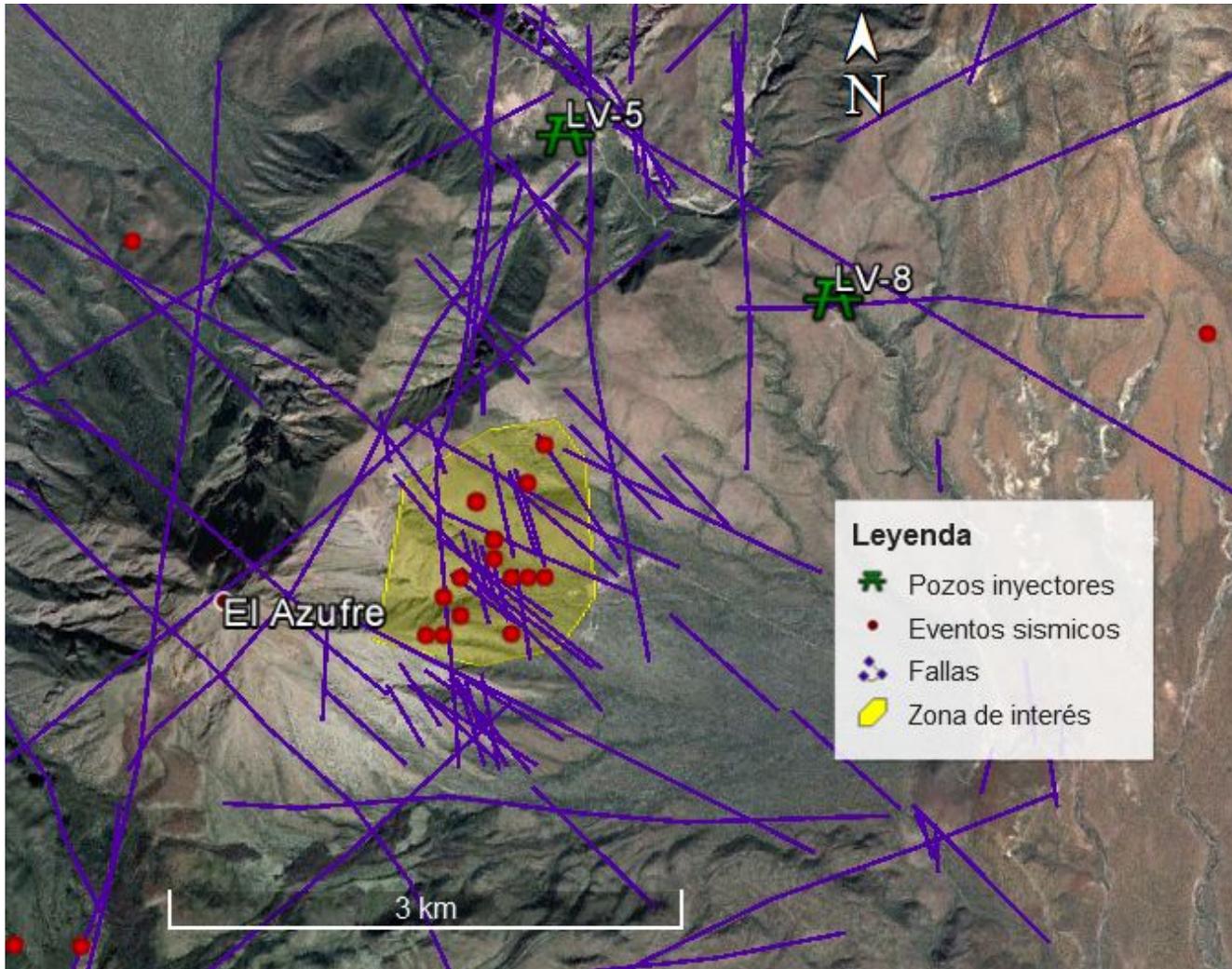


Figura 30: Mapa que muestra una zona de interés para obtener un mecanismo focal.

Como se puede ver en la figura 30, ese es el tipo de acumulaciones que se buscan para obtener un mecanismo focal. El mecanismo focal nos dirá si la sismicidad está asociada a alguna tipo de falla y de qué tipo de falla se trata en caso de tener asociación, y así podemos encontrar una relación entre la inyección de los pozos y las fallas a su alrededor, esperando que esto los comuniquen con los eventos sísmicos registrados.

Para obtener el mecanismo focal se utiliza nuevamente Seisan; al observar los arribos de la onda "P" de los eventos sísmicos, podemos detectar si el arribo es de compresión o de dilatación. A su vez estos arribos nos dirán el tipo de falla para clasificar y comprender de mejor manera el comportamiento de la sismicidad con respecto a esta.

2016 29 1810 8.5 L 27.512-112.587 4.3 CFE 4 0.0 0.8CCFE
 STR DIP RAK Source
 220 66 -38 FOCMEC

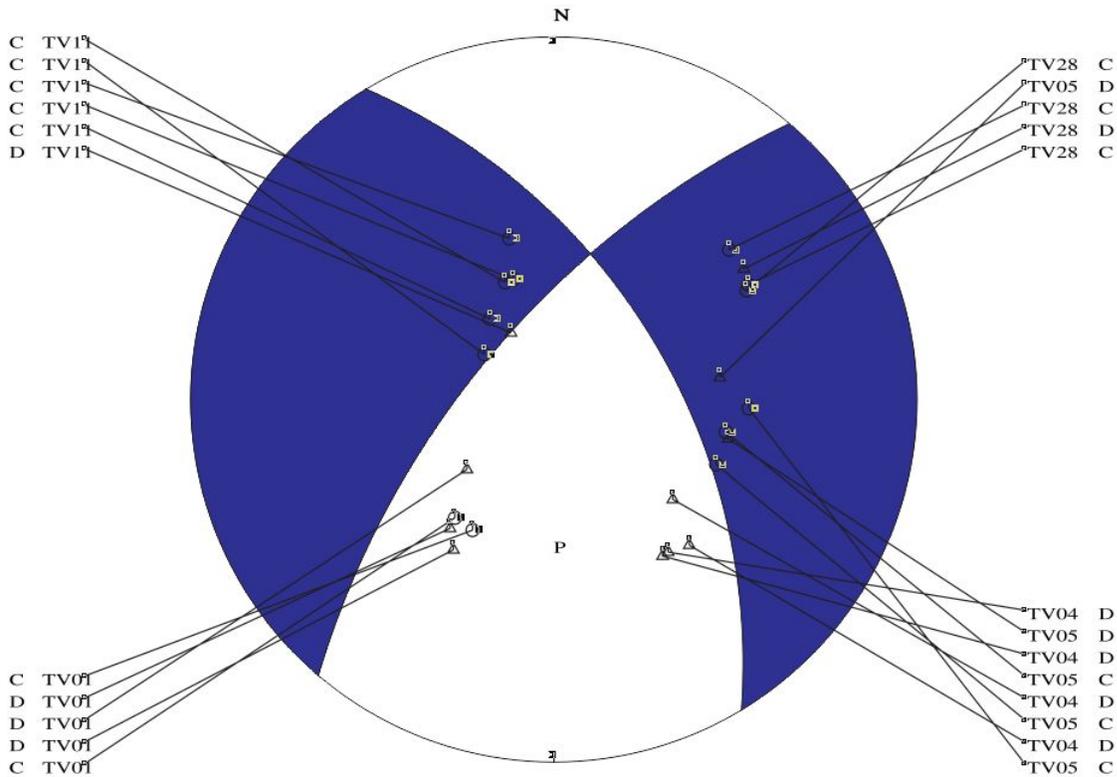


Figura 31: Mecanismo focal compuesto obtenido de analizar un grupo de eventos sísmicos.

Terminado el proceso obtendremos el siguiente diagrama de mecanismo focal (figura 31), y según la composición del mismo se conocerá el rumbo, echado y ángulo de inclinación de la falla así como el tipo de la misma.

4.2. Modelo de Velocidad

Para este estudio, se utilizó el modelo de velocidad presentado en la siguiente tabla. Este modelo fue tomado del estudio realizado por Jiménez et al. (2015) en su estudio de la sismicidad en el campo para los años 2009 y 2010.

Vp (km/s)	Profundidad (km)
1.240	0.000
2.310	0.250
3.000	0.500
4.500	1.520
6.300	7.000
7.600	11.00
8.200	25.000

Tabla 2: Modelo de velocidad utilizado para el campo Tres Vírgenes.

CAPÍTULO V: CASO BASE

5.1. Campo Tres Virgenes

El campo geotérmico de las Tres Vírgenes se encuentra en Baja California Sur, el campo está relacionado con un complejo volcánico cuaternario, compuesto de tres volcanes alineados de norte a sur con un yacimiento dominado por líquido. El área de interés para esta tesis contempla la zona de los volcanes La Virgen, El Azufre y su periferia, una superficie de 24 kilómetros cuadrados.

El campo geotérmico de Tres Vírgenes se encuentra localizado dentro del dominio tectónico transtensional del sistema de fallas laterales derechas que provocaron la separación de Baja California del occidente de México, configurando el actual Golfo de California o Mar de Cortés, proceso que se inició hace 12 Ma (millones de años), pasando transicionalmente de un ambiente de subducción de las Placas Farallón y Guadalupe por debajo de la placa de Norte América a un ambiente de "rift" después de los 5Ma. Dentro de este campo volcánico y sobre un basamento formado por rocas que van del Cretácico al Plioceno, se pueden reconocer tres grandes complejos volcánicos y de evolución diferente, La Caldera de Reforma, Caldera del Aguajito y el Complejo Volcánico de Tres Vírgenes, en este último podemos definir a dos subgrupos, Domos el Viejo y el Azufre.

5.1.1. Geología

La estratigrafía que podemos encontrar en zona de campo geotérmico es la siguiente: El volcán El Viejo está compuesto por rocas andesíticas y dacíticas en su mayoría domos, derrames de lava y flujos piroclásticos de bloques y ceniza y epiclásticos. El volcán el Azufre consiste de las rocas antes descritas con una composición dacítica. En cambio el volcán La Virgen presenta la mayor variación en cuanto al tipo de rocas y composición mineralógica. Aunque tiene un dominio de derrames de lava y domos presenta algunas secuencias piroclásticas importantes como los depósitos La Virgen y El Mezquital. De manera general en la Figura 32 se muestra la columna estratigráfica del campo TV.

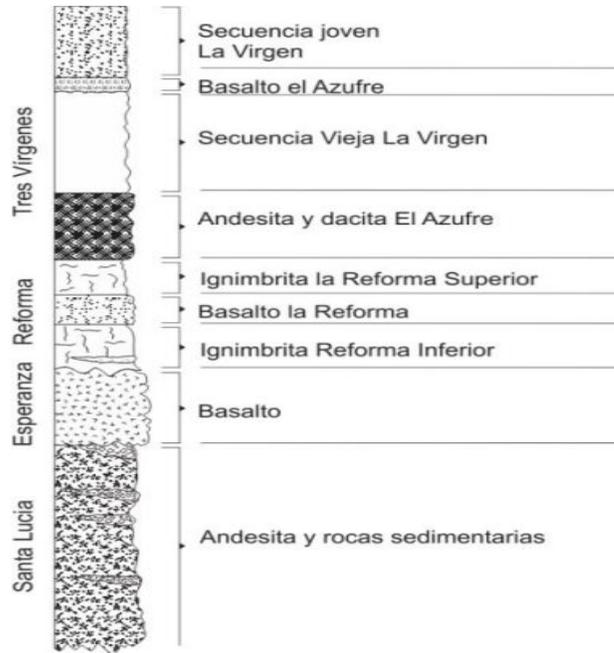


Figura 32: Columna estratigráfica del campo geotérmico Tres Vírgenes

Para realizar nuestro trabajo de investigación se tuvo que delimitar una zona de interés a partir de la cual tomaríamos toda la sismicidad ahí detectada como local, esta zona de estudio es la comprendida por el campo geotérmico de Tres Vírgenes en la actualidad, a su vez todo los pozos considerados, los sistemas de falla y la sismicidad detectada se encuentra del área delimitada en la siguiente imagen (Figura 33).

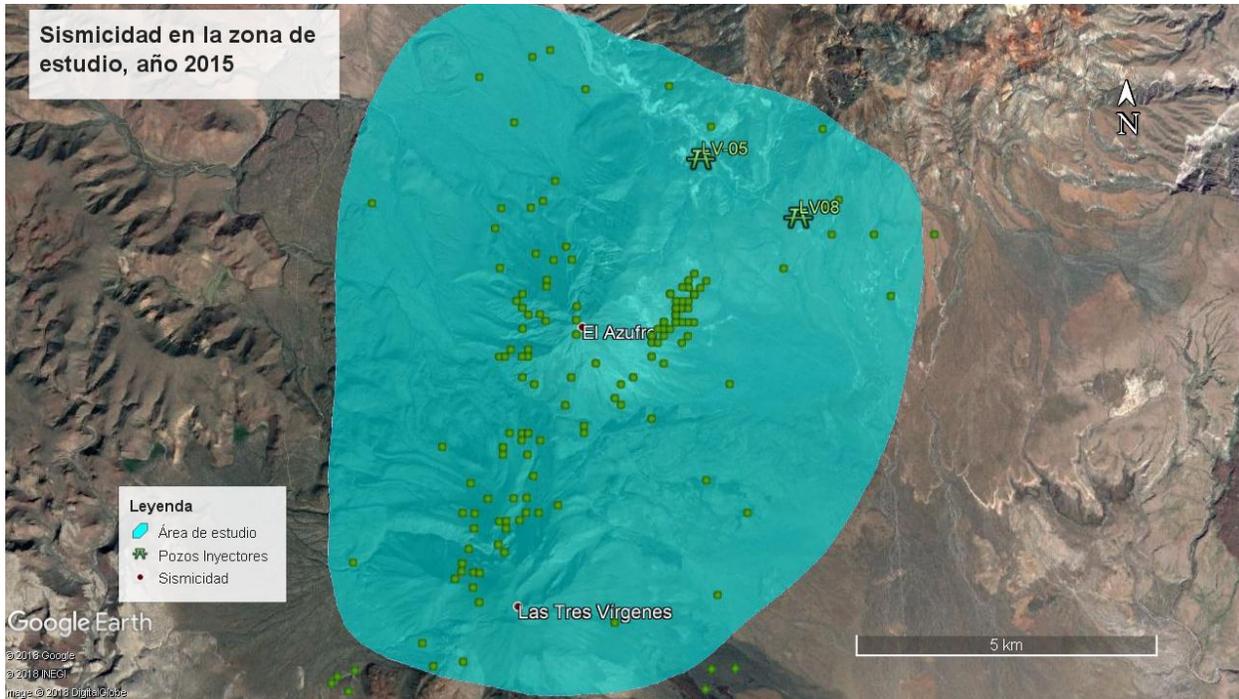


Figura 33: Área de estudio delimitada, con la sismicidad registrada en la zona para el año 2015.

5.1.2. Sistema de fallas

A continuación, en la figura 34, se muestra los sistemas de fallas presente en la zona de interés, dichos sistemas de fallas se encuentra a lo largo de todo el campo geotérmico, por lo que el conocer y posicionar los microsismos generados en dicha zona es de utilidad para saber la relación con las fallas, ya sea que estos sismos coinciden en posición con las fallas o que se encuentren en lugares totalmente ajenos.

Al encontrar una relación entre las acumulaciones de sismos sobre una falla se deben obtener el mecanismo focal compuesto y analizar la cercanía a un pozo de inyección para ver si hay una relación entre estos.

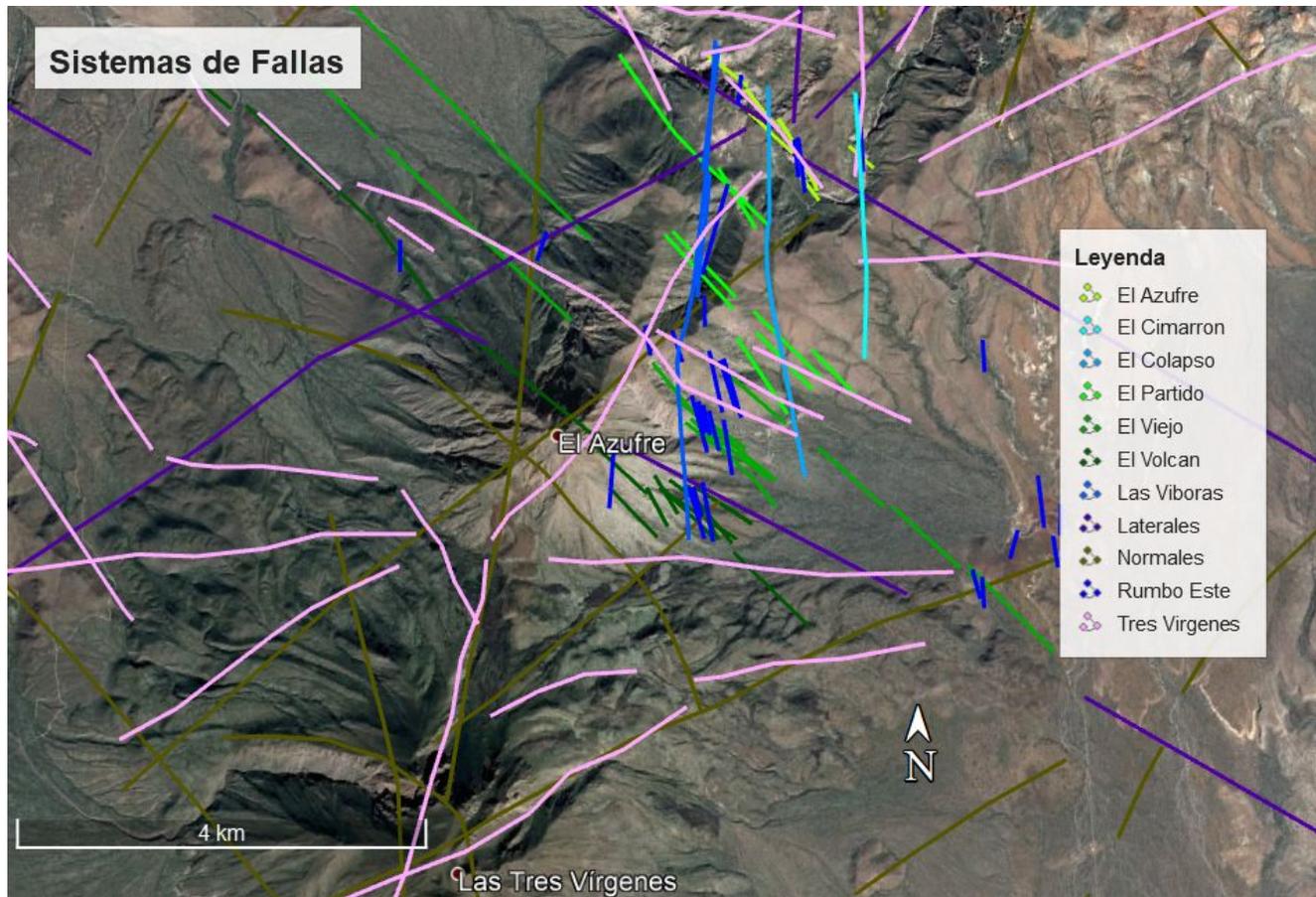


Figura 34: sistema de fallas del campo geotérmico Tres Virgenes.

5.1.3. Actividad en el campo geotérmico de Tres Virgenes, B. C. S.

La siguiente tabla sirvió de guía para escoger los pozos que serían utilizados durante la investigación de esta tesis, debido a la gran cantidad de pozos que se encuentra cerrados o en operación era necesario buscar los pozos óptimos que hubieran estado en funcionamiento todo el año de 2015 y 2016, así como para encontrar una relación entre la sismicidad y la inyección en un campo geotérmico es que se tenía que conocer el estado de los pozos y las operaciones registradas en la zona..

ACTIVIDADES EN POZOS EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE LAS TRES VÍRGENES, B.C.S.

Pozo	Condición	Fecha de rep.	P. Cab. (bara)	Vapor (t/h)	Agua (t/h)	Mezcla (t/h)	Entalpia (kJ/kg)	P. Sep (bara)	Tipo de Reparación	
LV-4A	Pre rep.	Nov. 2007	No alcanzo las condiciones de integración						5	Acidificado
	Post rep.		9,2	16	66	82	1 041			
	Pre rep.	Sep-Oct/2012	9	10	42	52	1 006	4,8	Acidificado	
	Post rep.		8,7	10,85	37,29	48,14	1 109	4,8		
	Desarrollo	Feb- Mar/2013	10,46	15	59	73	1 053	5	Ultimo desarrollo	
Cerrado	08-feb-14	remento de la producción el 07/10/2014, en Continua cerrado en la actuali								
LV-6	Pre rep.	2010	No alcanzo las condiciones de integración						4,9	Acidificado
	Post rep.		12,18	24	79	103	1 123			
	Inducción y Desarrollo	Del 02 al 05 de enero de 2010								
	2do Desarrollo	De abril a mayo de 2012								
	Cambio de P.O.	08 de Marzo de 2013 de 4" a 3.65"								
Revisión de P.O.	del 16 al 20 de noviembre de 2015									
LV-8	Segunda reparación	En abril de 2009								
	Tercera limpieza	En noviembre de 2012								
	Prueba de tres gtos	En marzo de 2009								
	Prueba de tres gtos	En enero de 2011								
	Prueba de tres gtos	Agosto de 2012								
	Prueba de tres gtos	Enero de 2013								
	Prueba de tres gtos	Diciembre de 2014								
Prueba de tres gtos	25 - 26 Noviembre 2015									
LV-10	En perforación	En el caso del pozo LV-10 toda la etapa de perforación a partir del día 26/09/2014 y hasta la fecha 08/03/15 en que se cerro la válvula maestra.								
	Prueba de tres Gtos	la prueba de inyeccion a gasto variable se realizo el dia 18/02/15 comenzando a las 19:45. Se realiza con 3 gastos de 50,70 y 90 t/h y la cual termina el día 19/02/15 a las 08:45								
	Prueba perdida agua	No se realizo								
	Inducción	el pozo inicio su induccion 17 de junio de al 30 de julio de 2015.								
	fluyendo solo	30 de julio al 25 de septiembre 2015								
fluyendo solo	09 de octubre al 19 de nobiembre de 2015. Posteriormente pozo cerrado a la fecha.									
LV-11	Cambio de condición	A partir del 24 de febrero de 2014 cambia su condición de fluir por P.O. de 5 3/8" a 7.5 hilos abiertos								
LV-11	Cambio de condición	A partir del 29 de mayo de 2015 cambia su condición de fluir por 7.5 a 8.0 hilos abiertos								
LV-13D	Pre rep.	2007	No alcanzo las condiciones de integración						5	Acidificado
	Post rep.		10,8	15	37	52	1 128			
	Pre rep.	2012	7,23	6	25	31	1 066	4,93	Acidificado	
	Post rep.		En Proceso de desarrollo							
	Prueba de tres Gtos	Septiembre de 2012								
	Inducción y Desarrollo	Octubre y noviembre de 2012								
	Evaluación	Febrero a Marzo de 2013								
	Evaluación	En mayo de 2014								
Revisión de P.O.	25 de noviembre de 2015									

Tabla 3: Actividades realizadas en los pozos presentes en el campo Tres Virgenes desde el 2007 al 2015.

Por último, en esta imagen (Figura 35) se puede observar toda la sismicidad que se presentó en el año 2015 y 2016. Es la información recopilada de todos los meses de ambos años correspondientes a los sismos locales detectados en la zona de interés.

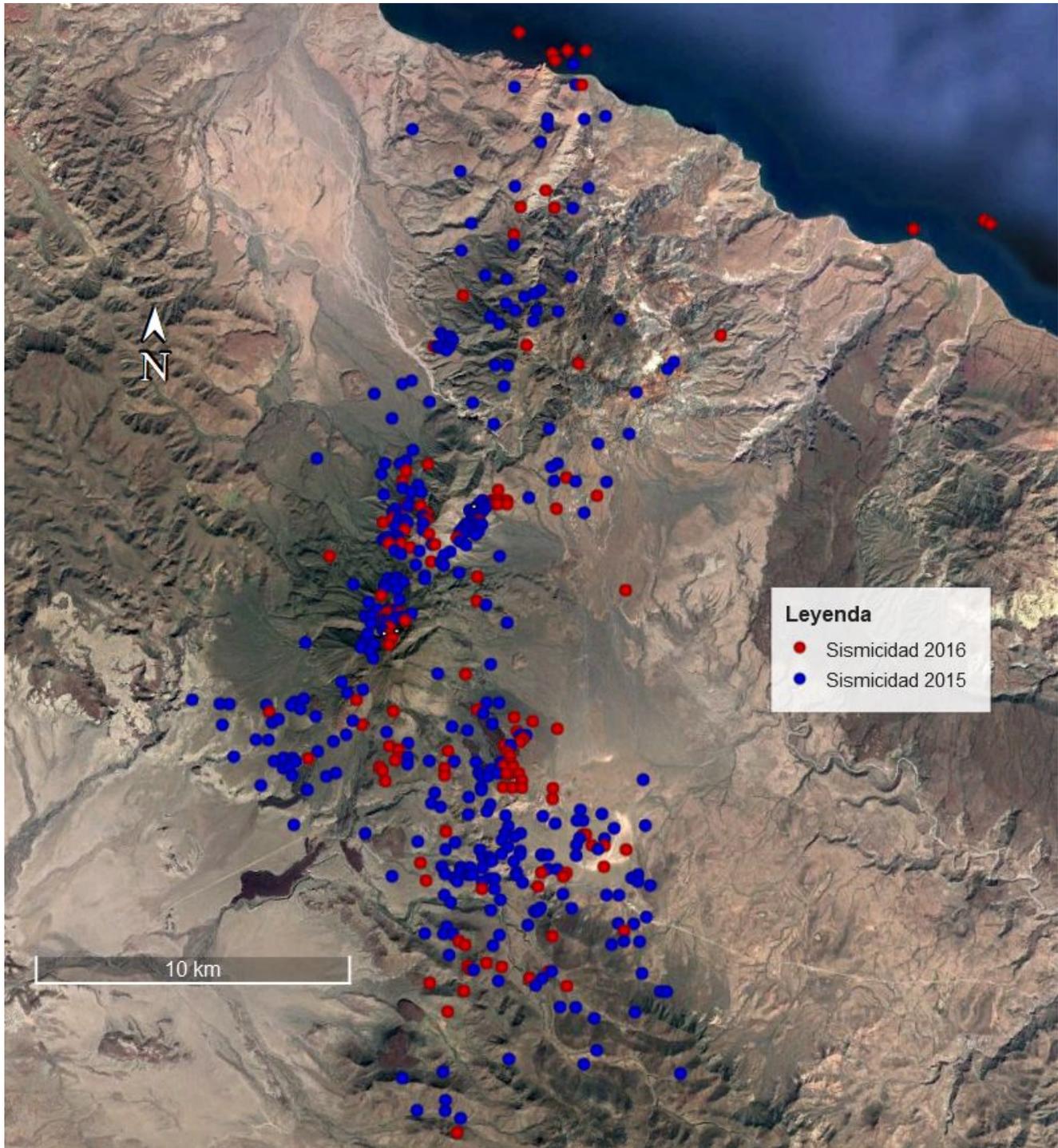


Figura 35: Sismicidad local en el campo geotérmico Tres Virgenes para los años 2015 y 2016.

5.2. Campo Los Humeros.

A 40 kilómetros de la ciudad de Perote, en el municipio de Chignautla, Puebla, se encuentra la Central Geotermoeléctrica Humeros. Su nombre se debe a que el vapor que se observaba en los

patios de las casas de los pobladores era confundido con humo, y la tierra que humea sobrevino en Los Humeros.

En 1970 entró en operación la primera de las ocho unidades turbogeneradoras, cada una de 5MW. Los fluidos del yacimiento se alojan a 2 mil 200 metros, y su fuente de calor es la cámara magmática que formó la caldera volcánica hace 100 mil años. El campo de Los Humeros tiene aproximadamente 25 kilómetros cuadrados, y en su extensión están perforados alrededor de 43 pozos geotérmicos, de los cuales 23 están en operación y tres de ellos se utilizan para reinyectar el agua a los pozos. Los pozos en operación irradian cada año más de 4 millones de toneladas de vapor y también producen más de 800 mil toneladas de salmuera; esta última se regresa por completo al yacimiento a través de tres pozos inyectores.

Cada unidad tiene una turbina y un generador; la turbina ocupa el vapor geotérmico para moverla y la hace girar a 5 mil 600 revoluciones por minuto (r. p. m.). El generador tiene un reductor que gira a mil 800 r. p. m. y genera la energía eléctrica con un voltaje de 4 mil 160 volts. De ahí se envía a un transformador que eleva este voltaje a 115 mil volts; CFE transmite la energía a alguna subestación en 115 mil, 230 mil y 400 mil volts. Una vez que la energía se transmite a alguna subestación, se une a las líneas de transmisión y se interconecta todo el voltaje al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). El SEIN es la red de conductores que interconecta la energía que se genera en todas las centrales de la República, excepto en la zona norte.

5.2.1. Geología

De acuerdo a estudios geológicos de Arellano et al. (2000) y Cedillo (1997), la estratigrafía de la caldera Los Humeros está conformada por nueve capas principales. Ésta información se complementa con estudios geofísicos de reflexión sísmica (COMESA, 1998) y gravimétricos (Campos-Enríquez, 1992), la litología aflorante en el campo Los Humeros data de esquistos del Pérmico Tardío en el norte del campo hasta basamentos de olivino de hace 20,000 años.

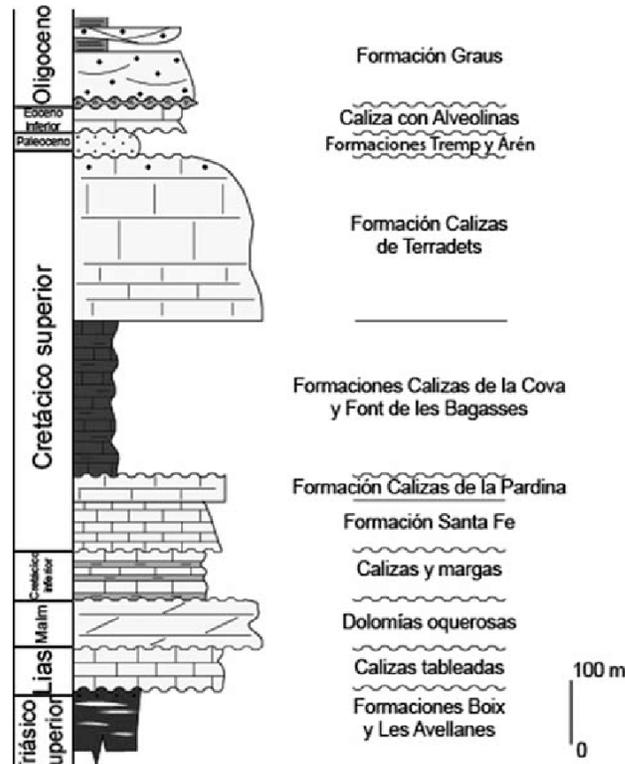


Figura 36: Columna estratigráfica correspondiente al campo geotérmico de Los Humeros.

El vulcanismo más reciente está representado por coladas de lavas ácidas, básicas y rocas piroclásticas que se observan en la columna estratigráfica de Los Humeros (Figura 36). El siguiente evento debió ser de tipo explosivo por la gran cantidad de material volcánico expulsado, ocasionando probablemente el vaciado parcial de la cámara magmática y el colapso del techo de la misma, originándose así la caldera de Los Humeros. Posteriormente, se sucedieron una serie de derrames de andesita basáltica y la emisión de grandes cantidades de pómez que cubrieron a la región (0.08 a 0.04 Ma). La fase final de la actividad volcánica del área está representada por derrames de composición basáltica que muestra una estrecha relación con el origen de la caldera del Xalapasco.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de comparar la sismicidad que se presenta en un campo geotérmico en relación con el gasto que se tiene en los pozos inyectoras y la influencia causada por sismos de gran magnitud en zonas ajenas o lejanas. Al comparar los tres elementos se busca encontrar un relación entre ellos, para ver qué tan influyente es la inyección o los sismos lejanos con la sismicidad que se presente en la zona, o si estos sucesos no causan efecto alguno en la zonas objetivo de esta tesis.

6.1. Datos de inyección, producción y sismicidad.

A continuación, se muestra una serie de gráficas en las que se compara la inyección realizada por los pozos LV-8 y LV-5 con la sismicidad ocurrida localmente en distintos periodos de tiempo. El objetivo de esto es encontrar una relación apreciable entre ambas estadísticas para determinar si existe inducción de sismicidad en la zona.

Para este caso de estudio se usaron los últimos datos disponibles, correspondientes a los años 2015 y 2016. Estos datos se encuentran desarrollados en los Anexos 1 y 2. Las gráficas obtenidas toman periodos de un mes, en los que resultará más fácil apreciar a simple vista la relación entre ambos fenómenos. Posteriormente, se presenta también una gráfica con los datos correspondientes a todo el año, donde se espera observar de igual manera evidencias de una relación entre cambios en la inyección y el aumento de la sismicidad.

De igual forma se incluyen mecanismos de focales compuestos en caso de encontrar enjambres de sismos que resulten de interés o tengan una posible relación con la producción-inyección de los pozos de estudio. Estos mecanismos a su vez no indican la relación de los enjambres con las fallas, a cual se encuentra asociada y el tipo de falla se tiene.

Además, se muestra con cada gráfica un mapa de la sismicidad local ocurrida en la zona, en las que se permite observar su proximidad a los pozos y si se encuentran comunicados a ellos a través de las fallas existentes en la zona. Esto con el objeto de demostrar que la sismicidad registrada pudo ser provocada directamente por los pozos, objetivo de este trabajo. Cada sismo se encuentra simbolizado por un punto rojo en las figuras posteriores.

6.1.1. Septiembre 2015.

En las siguientes secciones se analiza la sismicidad que se presentó en el campo geotérmico de las Tres Vírgenes, para este análisis se tomaron los meses que más sismicidad presentaron a lo largo de año 2015 y 2016, de igual forma se tomó en consideración el tener los datos de inyección-producción y acontecimientos de sismos de gran magnitud de esas fechas para llevar a cabo un trabajo más completo a la hora de correlacionar estas variables.

El primer caso de interés que se presentó fue en septiembre de 2015, en la siguiente imagen (Figura 35) se puede ver toda la sismicidad del mes de septiembre junto con las fallas que se encuentran en el campo, los pozos inyectoros y en color amarillo se remarca una zona de interés por la cantidad y acumulación de sismos presentes. Lo que se puede destacar en esta imagen es el enjambre en la zona amarilla el cual se encuentra sobre un sistema de fallas cuya trayectoria pasa por el área de efecto de los pozos inyectoros, al investigar la naturaleza de este enjambre se encontró que todos sucedieron el mismo día (19 de septiembre) en un lapso de tiempo muy corto, una vez con esta información procedemos a graficar de forma comparativa los sismos y los programas de inyección-producción de los pozos de estudio para encontrar una relación.

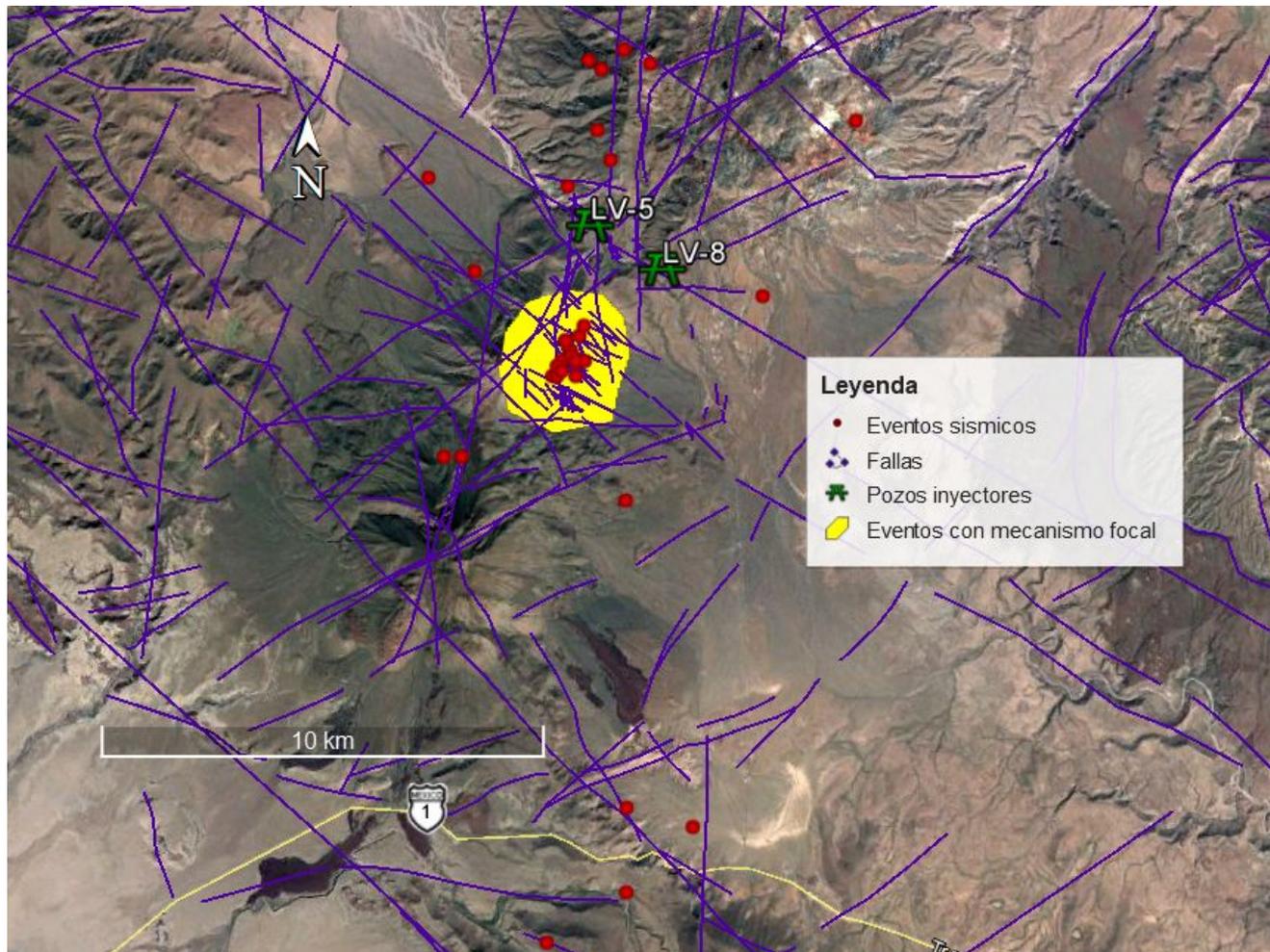


Figura 37: Sismicidad local del campo geotérmico Tres Vírgenes para el mes septiembre del año 2015

Una vez se observó la naturaleza y posición de este enjambre se procedió a analizar los gastos de inyección-producción que tuvieron los pozos en el campo como se puede ver en la FIGURA 37. Al ver la gráfica, se encontró una declinación considerable en los pozos inyectoros pocos días antes de que se presentó el enjambre de sismos en la cercanía de los pozos. Como se explicó en los antecedentes, al haber un cambio en los gastos de inyección de un pozo suele pasar un periodo de tiempo (variación de +/-6 días) para que se produzca una respuesta sísmica en la zona. Conociendo el efecto anterior se descubrió que después de la reducción de gasto de inyección del 14 de septiembre (700 toneladas/día) se produjo a los 5 días (el 19 septiembre) el enjambre con una cantidad de 9 sismos en un intervalo de tiempo menor a dos horas.

Lo anterior es un claro ejemplo de que la variación de inyección que se presentó el 14 de septiembre de 2015 fue el detonante de la sismicidad presentada el 19 de septiembre de 2015.

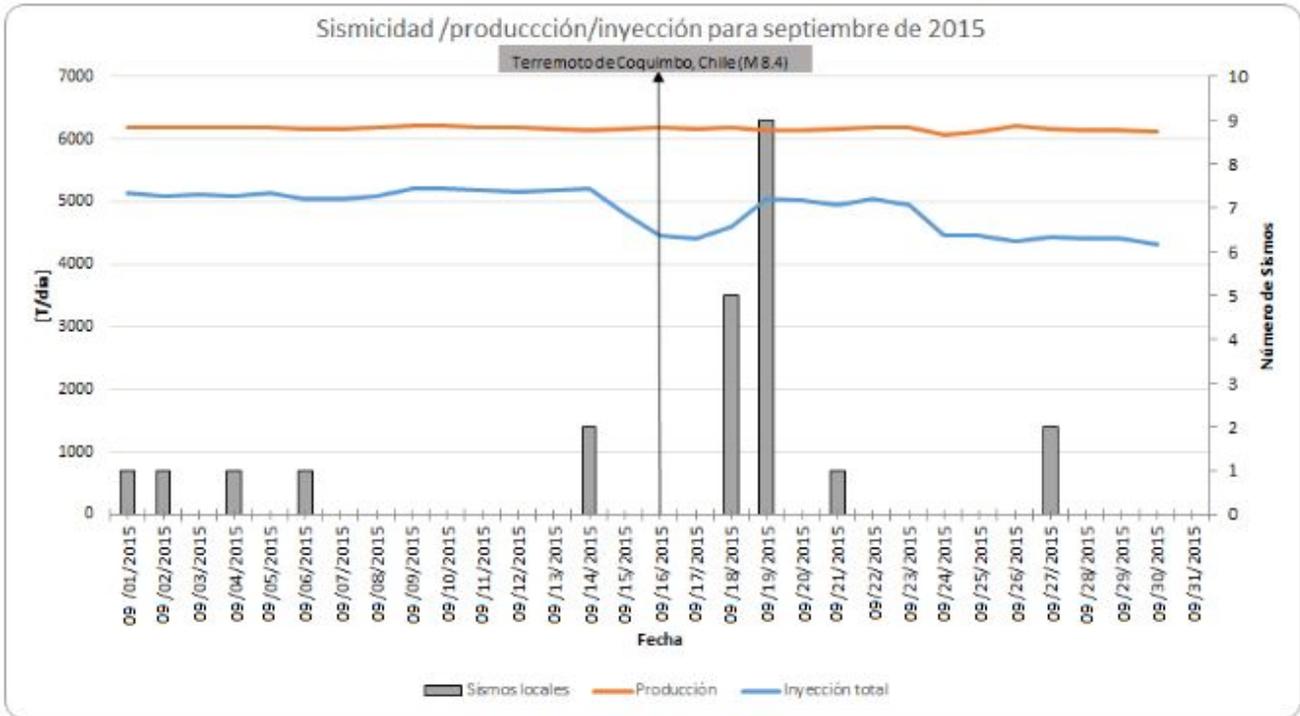


Figura 38: Gráfica de comparación de la inyección y producción totales, y el número de sismos locales ocurridos en el mes de septiembre de 2015 en el campo Tres Vírgenes.

Con la relación entre sismicidad e inyección demostrada se procede a calcular el mecanismo focal compuesto del enjambre para comprobar la naturaleza de los sismos y su relación con las fallas presentes en la zona. Al obtener el mecanismo focal compuesto de SEISAN tenemos como resultado que el enjambre está asociado a la falla “Las víboras” la cual se extiende por debajo del área de influencia de los pozos inyectoras hasta la zona donde se localizó el enjambre de sismos del 19 de septiembre.

El mecanismo focal compuesto presentado en la Figura 38 (diagrama de pelota de playa) nos da la siguiente información, la falla “Las víboras” es una falla oblicua que presentan un rumbo de 272°, un echado de 79° y un ángulo de inclinación de 44°: con esta información es evidente la relación de la falla y el enjambre al transmitir la energía generada por el cambio de inyección de los pozos.

2015 9 4 0935 32.7 L 27.505-112.567 3.7 CFE 4 0.1 1.4CCFE
 STR DIP RAK Source
 272 79 44 FOCMEC

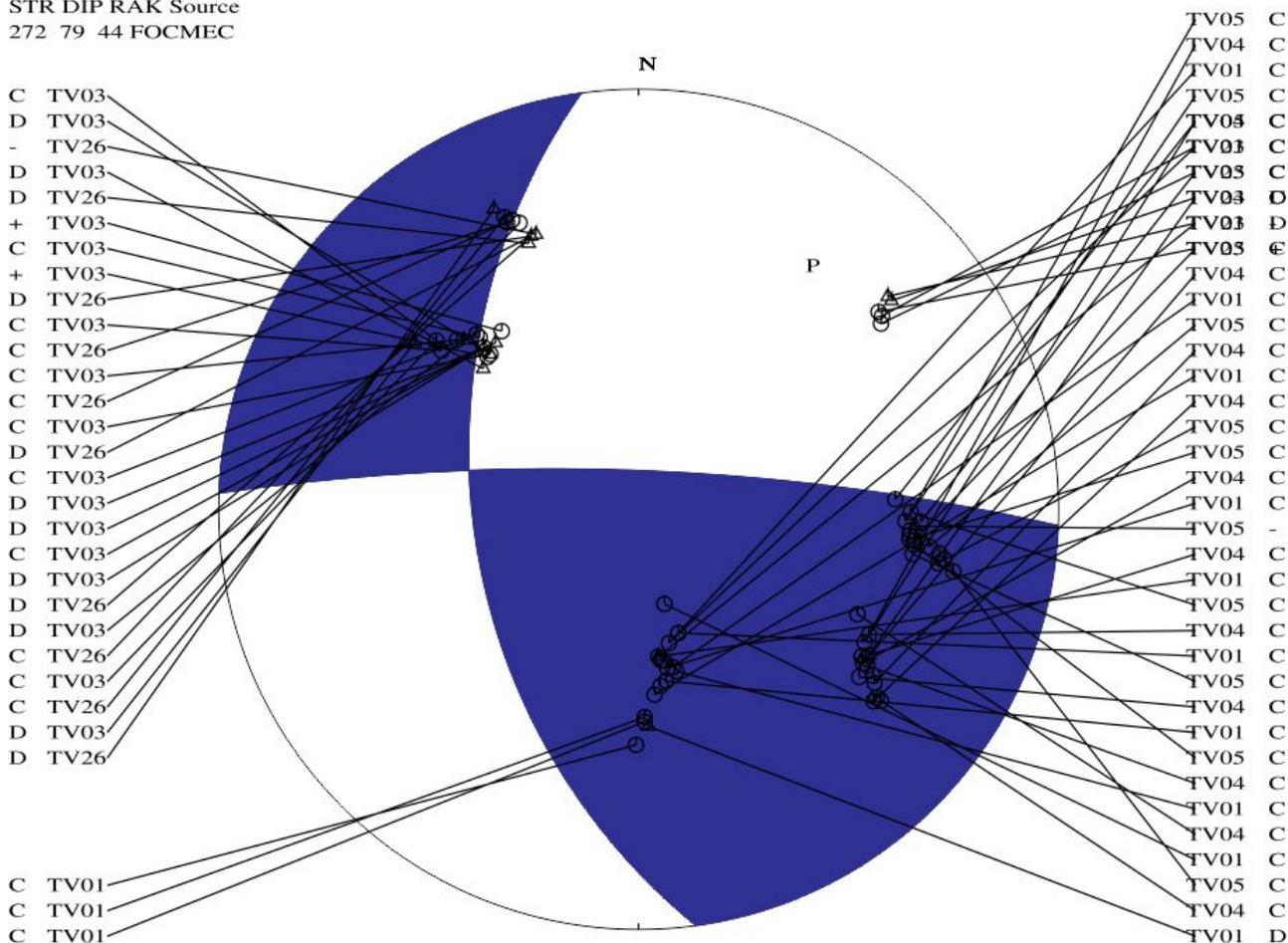


Figura 39: Mecanismo focal compuesto del mes de septiembre de 2015.

En este primer periodo, la relación queda evidenciada cuando, luego de un periodo de inyección constante, se observa un cambio repentino en el ritmo de inyección a la mitad del mes de septiembre. Es sencillo observar que cuando el ritmo de inyección se mantiene constante la sismicidad se mantiene entre cero y uno al día, y que al alterarse el ritmo, el número de sismos se incrementa repentinamente hasta alcanzar los 9 eventos en un día. El mapa nos permite observar, también, que la mayor parte de los eventos se encuentra comunicado al pozo mediante alguna falla.

En la Figura 38 puede observarse también la ocurrencia de un terremoto de magnitud 8.4 ocurrido el 16 de septiembre de 2015 en Coquimbo, Chile. Este evento ocurrió a las 19:54 (hora local de Chile, UTC -3), por lo que se procedió a revisar los registros de sismicidad del campo para ese día y el próximo, esperando encontrar alguna alteración que pueda estar relacionada con el mismo. En la Figura 40 se presenta el tambor de sismogramas registrados en la estación base (TV01) del campo Las Tres Vírgenes.

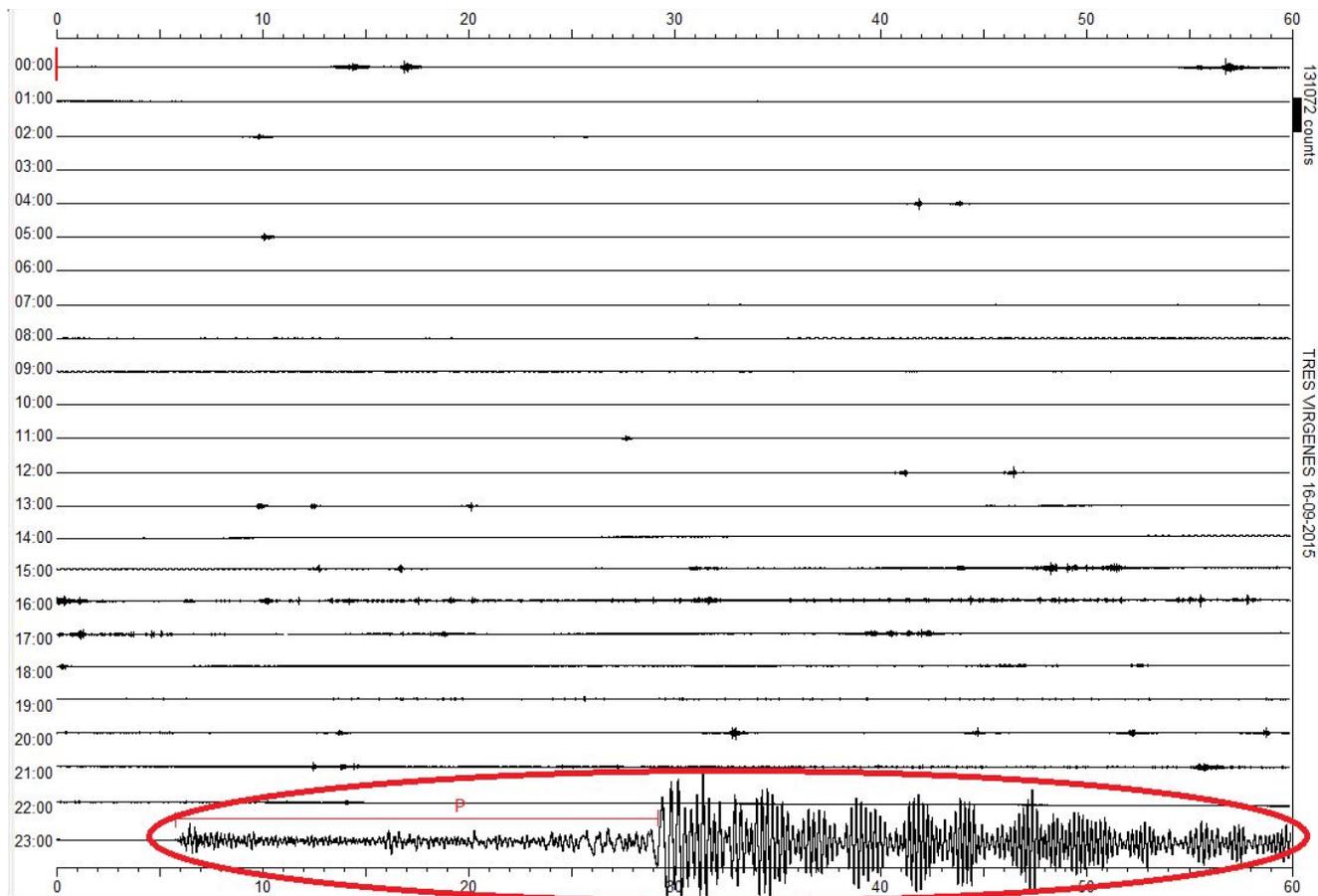


Figura 40: Tambor sísmico de la red en Tres Virgenes que detectó el sismo de Coquimbo-Chile (M 8.4).

Resulta evidente el impresionante efecto que el terremoto tuvo en este campo geotérmico. El evento se ve registrado a las 23:06 del día 16 de septiembre, lo que tiene sentido al tomar en cuenta la diferencia de zonas horarias y el retraso que el registro de los sismógrafos suele tener (comúnmente de un par de horas). Esto se comprueba al observar el tiempo de arribo de las ondas P en el registro, ya que entre más largo sea este tiempo, el epicentro del evento será más lejano. Esto demuestra la presencia de sismicidad inducida en el campo debida únicamente a este terremoto ocurrido en el sur del continente.

6.1.2. Octubre 2015

Ahora, continuando con la misma metodología de investigación y análisis, escogimos el mes de octubre de 2015 para localizar su sismicidad en busca de una relación similar a la anterior. Una vez terminada la localización se observó otra acumulación de sismos de interés en una zona cercana a los pozos y con sistemas de fallas presentes. En la sección amarilla del mapa (Figura 41) se observa un enjambre de 5 sismos detectados el 18 de octubre por lo que se procedió a revisar la gráfica de gastos de inyección de esas fechas.

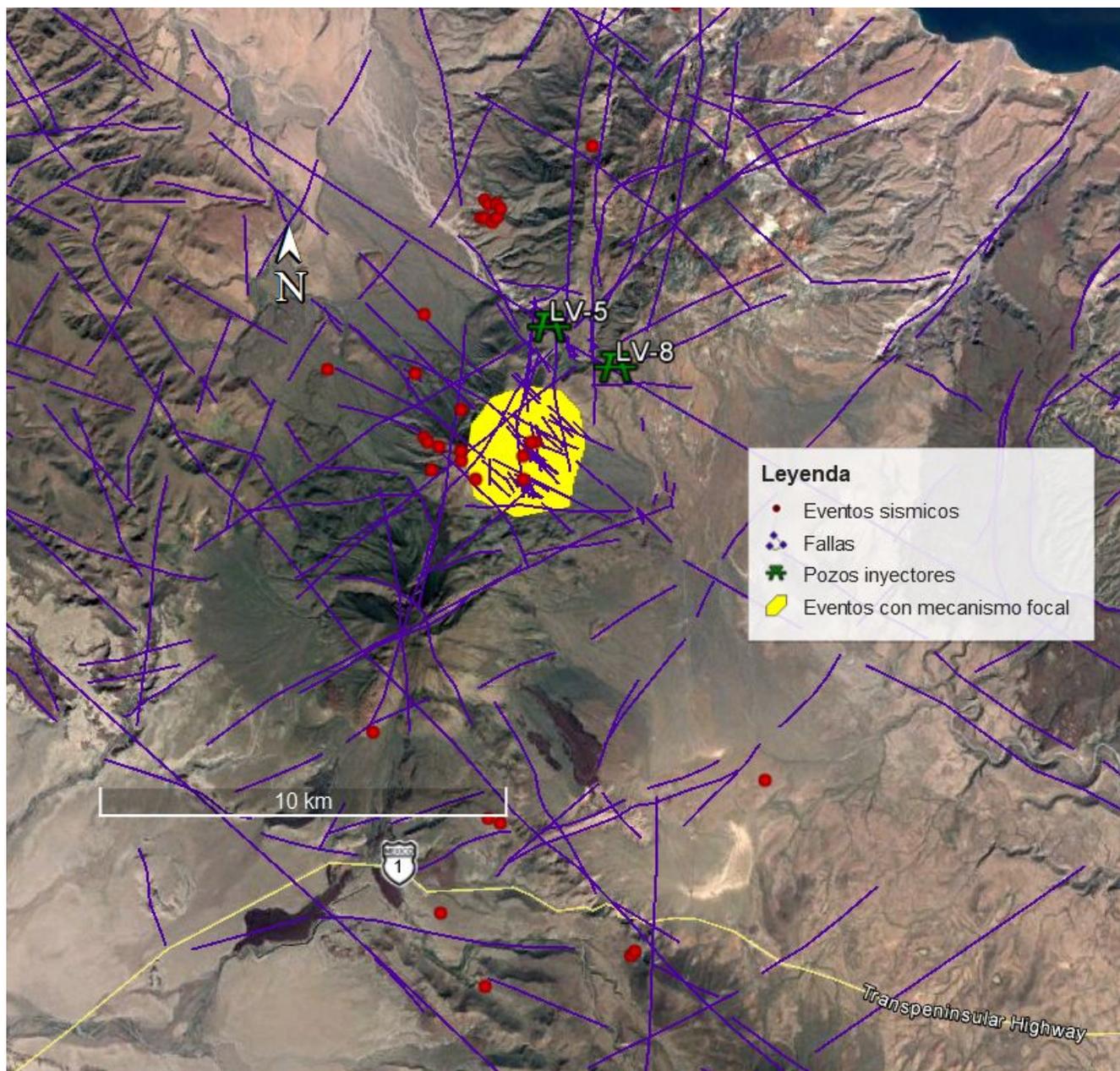


Figura 41: Sismicidad local del campo geotérmico Tres Virgenes para el mes octubre del año 2015.

Analizando la Figura 42 observamos en la gráfica un aumento de 1000 toneladas/día en el gasto de inyección el día 10 de octubre; de igual forma, a pasado un intervalo de tiempo de 8 días se presenta el enjambre de 5 sismos ya mencionado, por lo que se puede deducir, de igual forma, que esa sismicidad fue inducida por el cambio brusco que se presentó en la tasa de sismicidad en los días anteriores.

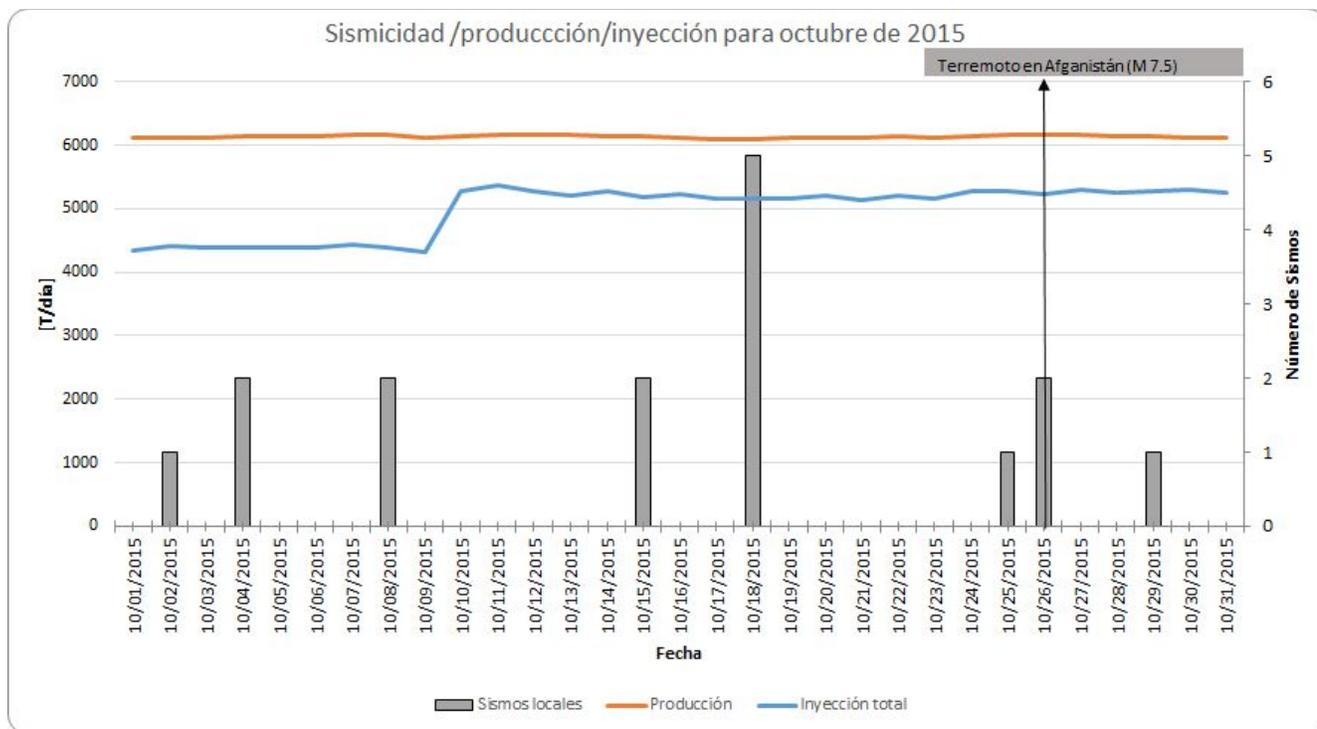


Figura 42: Gráfica de comparación de la inyección y producción totales, y el número de sismos locales ocurridos en el mes de Octubre de 2015 en el campo Tres Vírgenes.

Al comprobar la sismicidad inducida, se procede a calcular el mecanismo focal compuesto de los sismos de interés. Resulta sumamente interesante observar que el enjambre se encuentra sobre la misma falla que el caso anterior, “Las víboras”, lo que no sólo comprueba el relación de la sismicidad en esa zona con los cambios de inyección y los resultados positivos de la investigación, además nos marca un punto interés ya sea para un futuro análisis más exhaustivo o para plantear la ubicación un nuevo pozo productor efectivo.

El mecanismo focal compuesto presentado en la FIGURA 43 (pelota de playa) nos da la siguiente información: la falla “Las víboras” es una falla oblicua que presenta un rumbo de 69° , Un echado de 64° y ángulo de inclinación de 15° . Con esta información es evidente la relación de la falla y el enjambre al transmitir la energía generada por el cambio del ritmo de inyección de los pozos. Este mecanismo focal comprueba la naturaleza oblicua de la falla “Las víboras” y la amplia relación que tiene con los pozos inyector LV-5 y LV-8.

2015 10 4 1133 57.0 L 27.511-112.564 4.5 CFE 3 0.0 2.6CCFE
 STR DIP RAK Source
 69 64 -15 FOCMEC

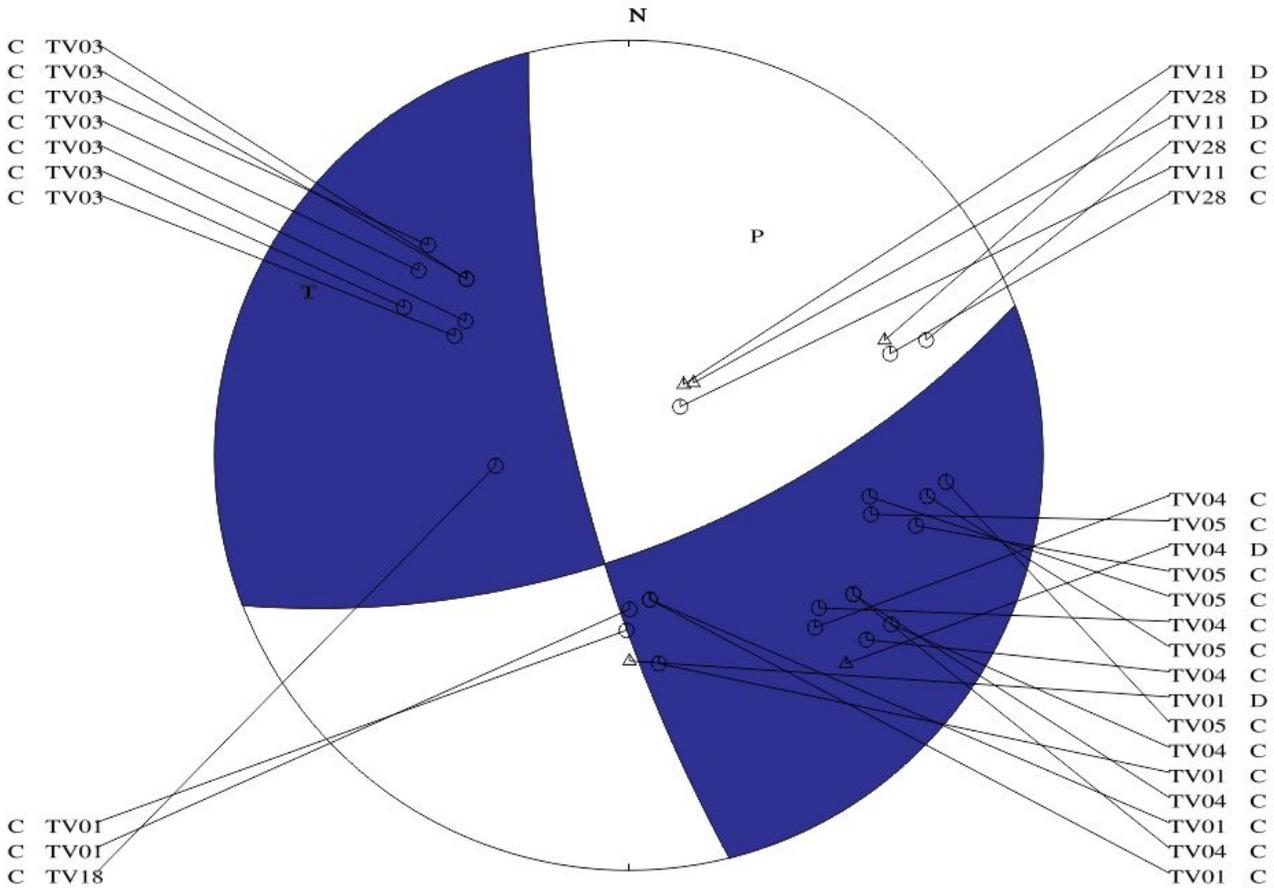


Figura 43: Mecanismo focal compuesto del mes de octubre de 2015.

En este segundo gráfico se observa un único cambio en el ritmo de inyección y, posteriormente, un aumento brusco en la cantidad de sismos. Este caso también comprueba la relación entre ambas circunstancias, aunque el efecto haya sido menos inmediato (8 días).

El terremoto de Afganistán, de magnitud 7.5, no demostró tener un efecto directo sobre el campo al analizar los tambores sísmicos correspondientes. Esto era predecible debido a la gran distancia desde el epicentro, ubicado en otro continente, al campo analizado.

6.1.3. Febrero 2016.

Pasando a los casos del año 2016, realizamos el análisis del mes de febrero (Figura 44) donde se localizaron 79 sismos. Para sorpresa de nuestra investigación este fue el mes que tuvo un comportamiento más errático en cuanto a los cambios en los gastos de inyección y las acumulaciones de sismos presentes; al observar la localización de los sismos observamos

acumulaciones interesantes de sismos en el suroeste del campo geotérmico, por lo cual se delimitó la zona de amarillo y se prosiguió a investigar la naturaleza de estos sismos.

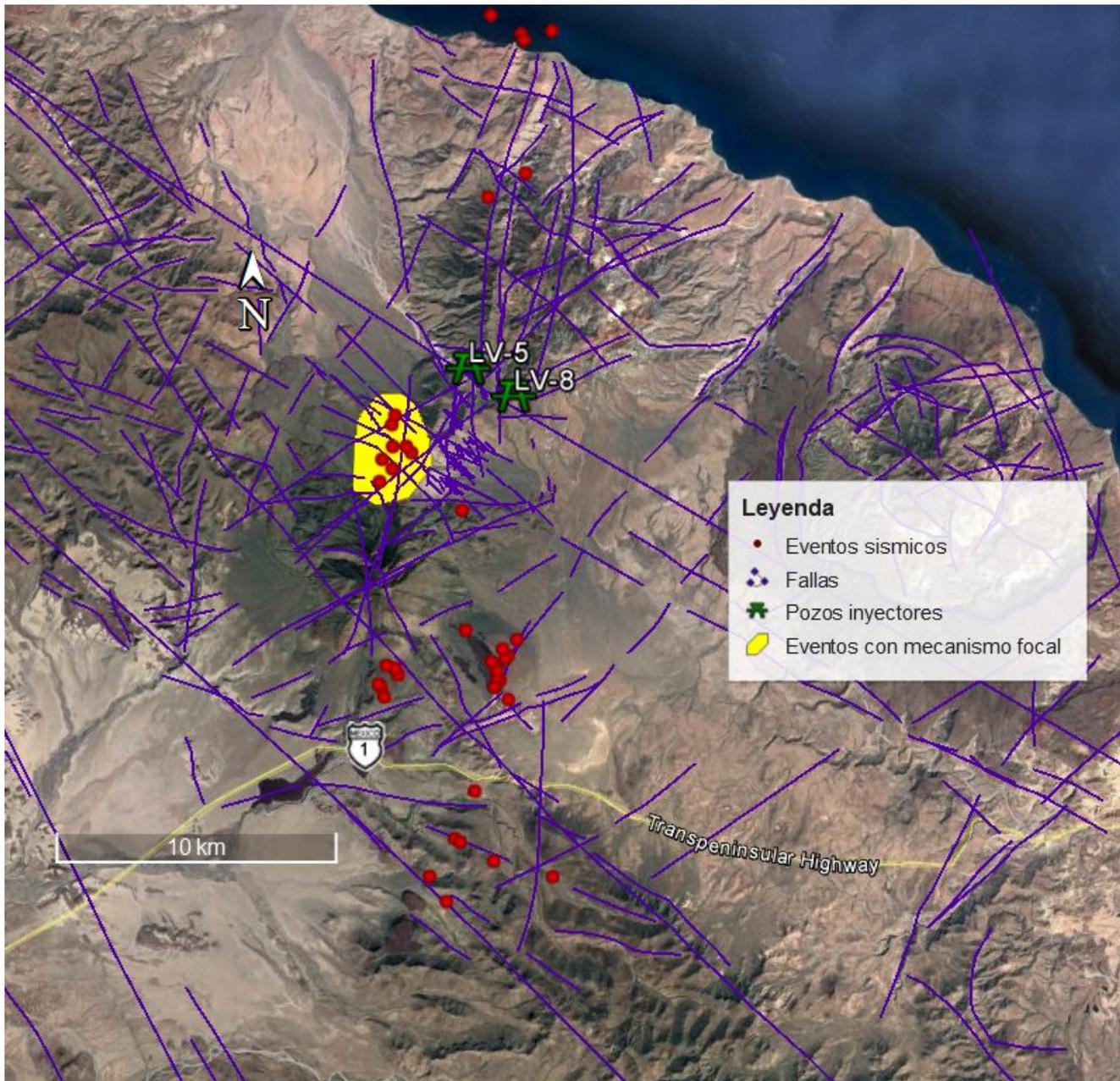


Figura 44: Sismicidad local del campo geotérmico Tres Vírgenes para el mes febrero del año 2016.

Al investigar los sismos de forma individual encontramos dos grupos de sismos de interés, los cuales se produjeron entre el 12 y 13 de febrero; estos sismos suman un total de 15 eventos que, aunque detectaron en dos días diferentes, son parte de un enjambre que ocurrió finalizando el día 12 y empezando el día 13 de febrero. De igual forma, ya se mencionó que este mes presentó cambios muy erráticos en la tasa de inyección de los pozos, pero al ubicar nuestro enjambre podemos ver que

el cambio más grande en cuanto a inyección se presentó 4 días antes del mismo, el 9 de febrero, donde la inyección aumentó en 200 toneladas/día.

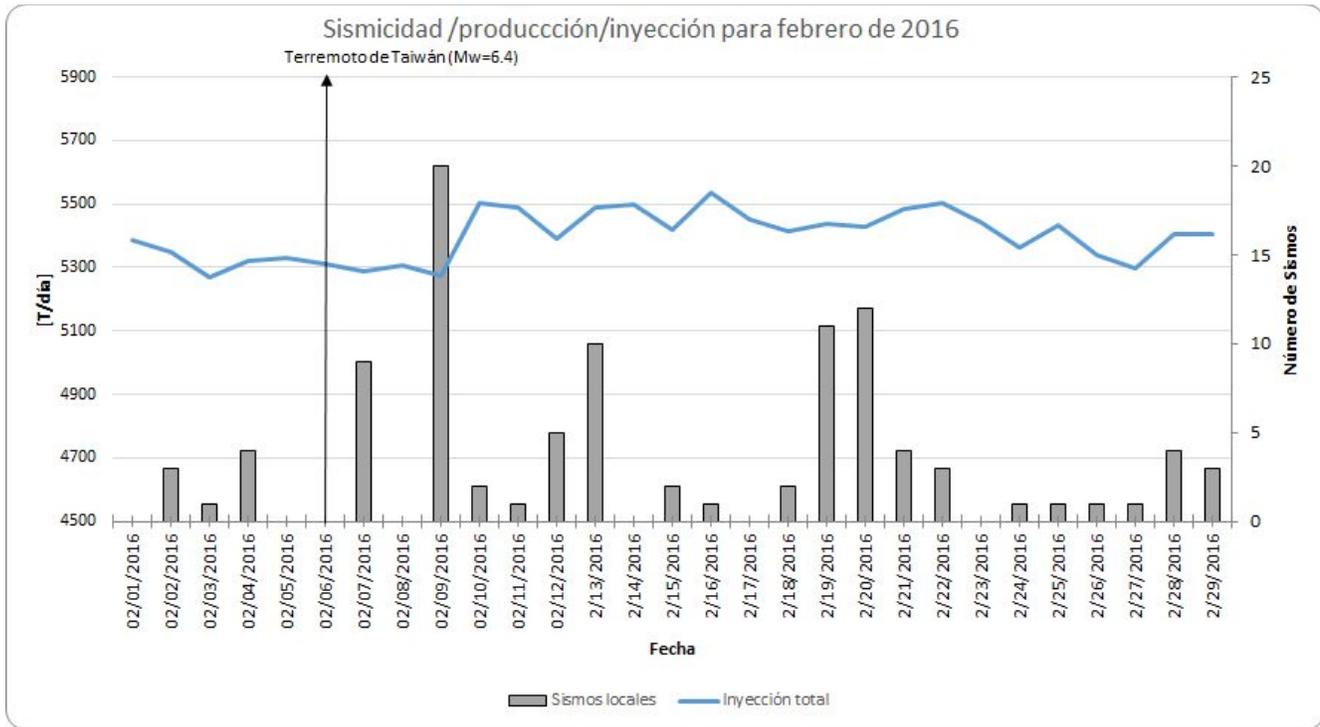


Figura 45: Gráfica de comparación de la inyección total y el número de sismos locales ocurridos en el mes de febrero de 2016 en el campo Tres Virgenes.

Al volver a encontrar la relación en la Figura 45 entre el cambio de los gastos de inyección (el 9 de septiembre aumentó de 200 ton/día) y el aumento de la sismicidad en la zona (enjambre encontrado el 12 y 13 de febrero con 15 eventos sísmicos localizables) en un intervalo de solo 4 días de diferencia es que se procede a calcular el mecanismo focal compuesto de estos eventos sísmicos para asociarlos al sistema de fallas sobre el que se encuentran.

Una vez Seisan arroja el resultado, vemos que la falla que se asocia a esta acumulación de sismos es la falla “El Viejo”, que presenta un comportamiento oblicuo y se extiende desde la localización de los sismos y pasa por las cercanías de los pozos inyectoros. El mecanismo focal compuesto presentado en la Figura 46 (pelota de playa) nos da la siguiente información: la falla “El Viejo” es una falla oblicua que presenta un rumbo de 220° , un echado de 66° y ángulo de inclinación de 38° .

En este tercer caso se vuelve a demostrar que los cambios de inyección, después de un periodo corto de tiempo, producen sismicidad inducida en la zona; a su vez, esta sismicidad se presenta sobre fallas que están o se encuentran en la cercanía de los pozos, sobre los cuales la tasa de inyección es modificada.

El terremoto más grande ocurrido en este mes fue en Taiwán y, al igual que en el caso anterior, no muestra efecto alguno sobre el registro de sismicidad del campo. Esto seguramente se debe, igual que el caso anterior, a la distancia entre ambos países, ubicados en distintos continentes.

2016 29 1810 8.5 L 27.512-112.587 4.3 CFE 4 0.0 0.8CCFE
 STR DIP RAK Source
 220 66 -38 FOCMEC

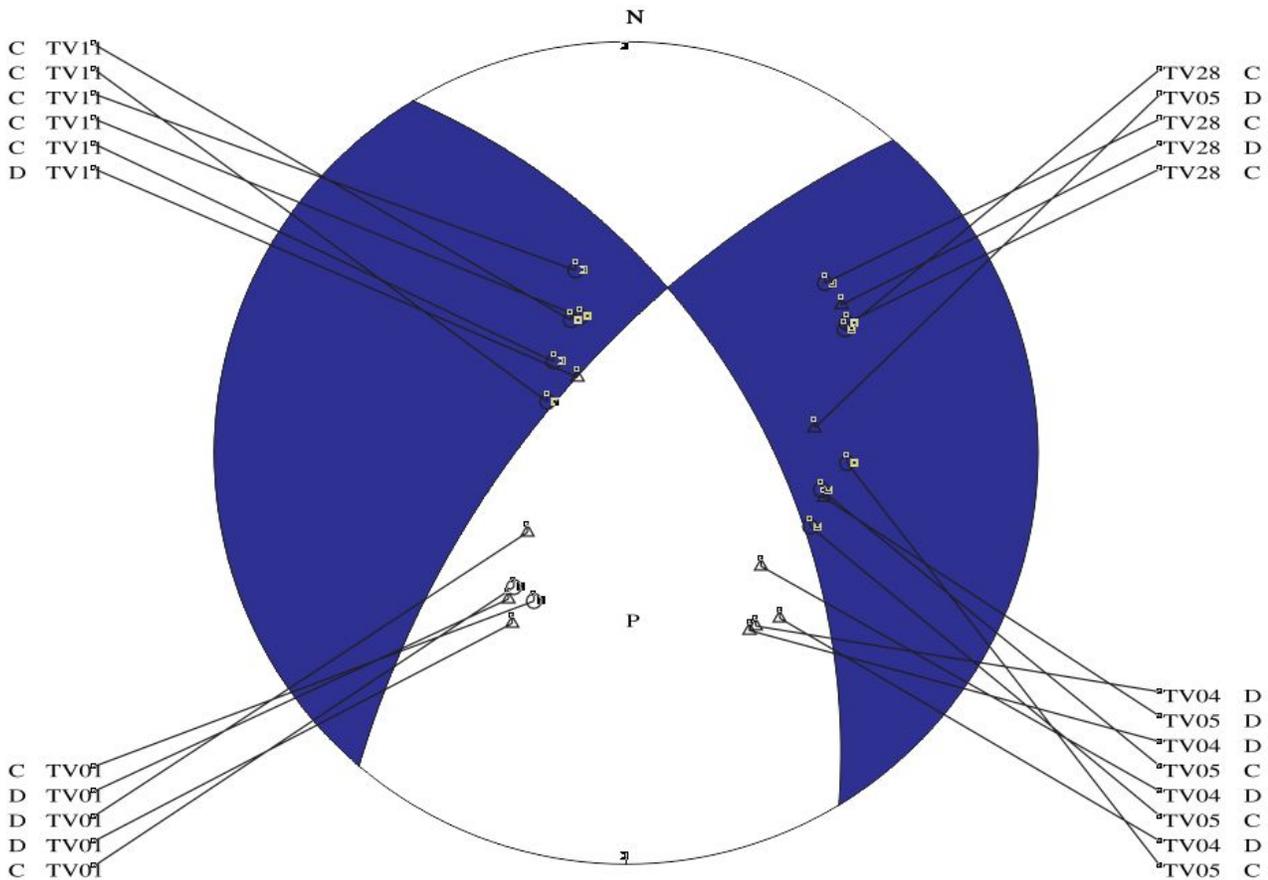


Figura 46: Mecanismo focal compuesto del mes de febrero de 2016.

6.1.4. Junio 2016.

Para el cuarto y último caso de estudio se eligió el mes de junio del 2016 (Figura 47) en el cual se encontraron dos enjambres de interés: el primero, más cercano a los pozos, ubicado sobre la falla “El Viejo” y el segundo, ubicado más abajo sobre el sistema de fallas “Tres Vírgenes” (mostrado de amarillo en la figura 47). En este caso se eligió el segundo por contar con un mayor número de sismos (10 sismos), por lo que se procedió a comparar esta actividad inusual con los gastos de inyección presentes durante esas fechas.

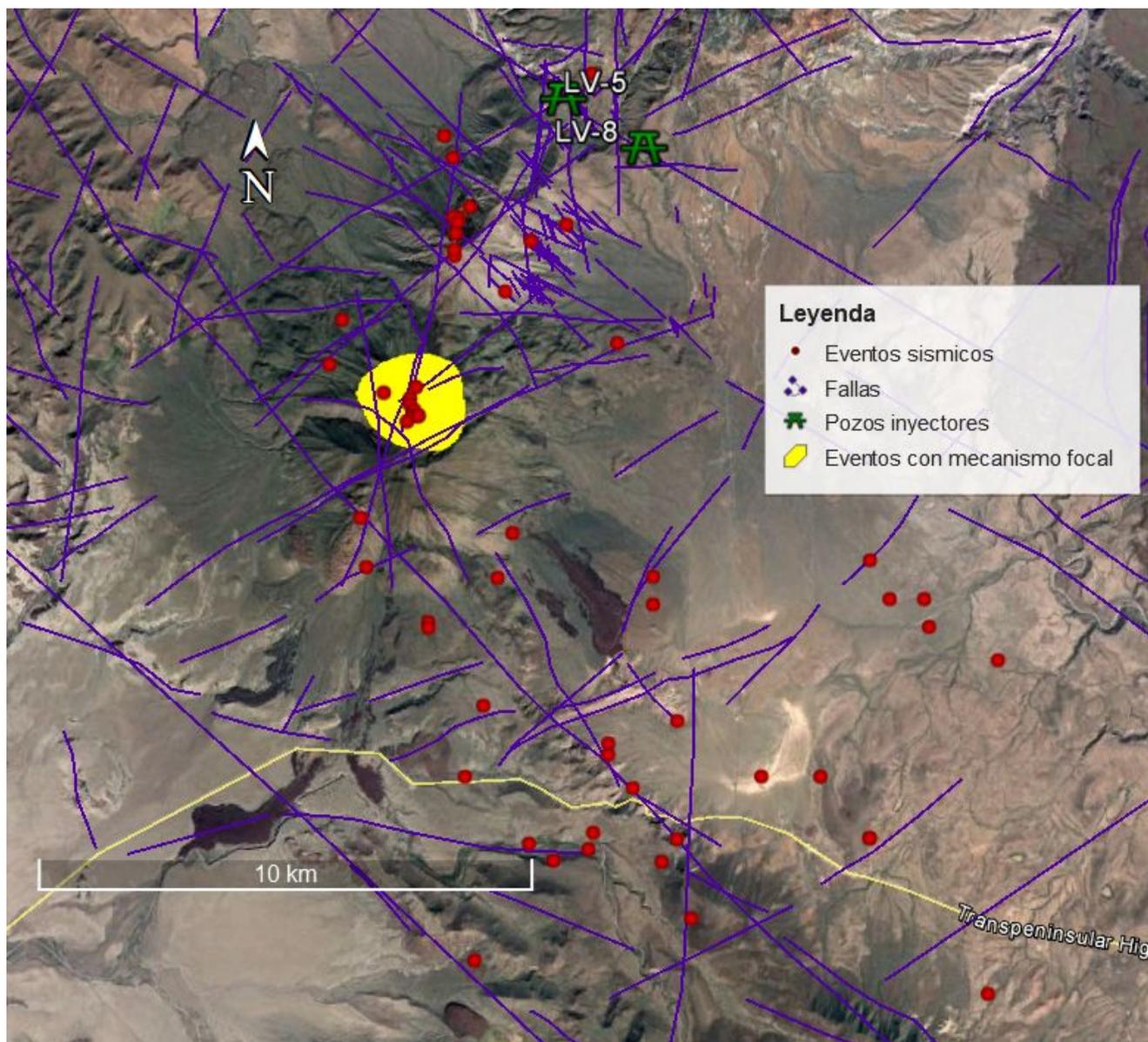


Figura 47: Sismicidad local del campo geotérmico Tres Virgenes para el mes junio del año 2016.

Revisando los sismos del enjambre seleccionado, se observó que estos sucedieron el día 18 de junio del año 2016. Tomando en cuenta esta fecha se puede ver en la gráfica de la Figura 48 que 4 días antes del suceso del enjambre se produjo una reducción del gasto de inyección en 100 toneladas/día (14 de junio). Como ya se ha manejado en los tres casos de estudio anteriores con esto se comprueba la relación de la sismicidad con el cambio de inyección y se logra uno de los objetivos de esta tesis.

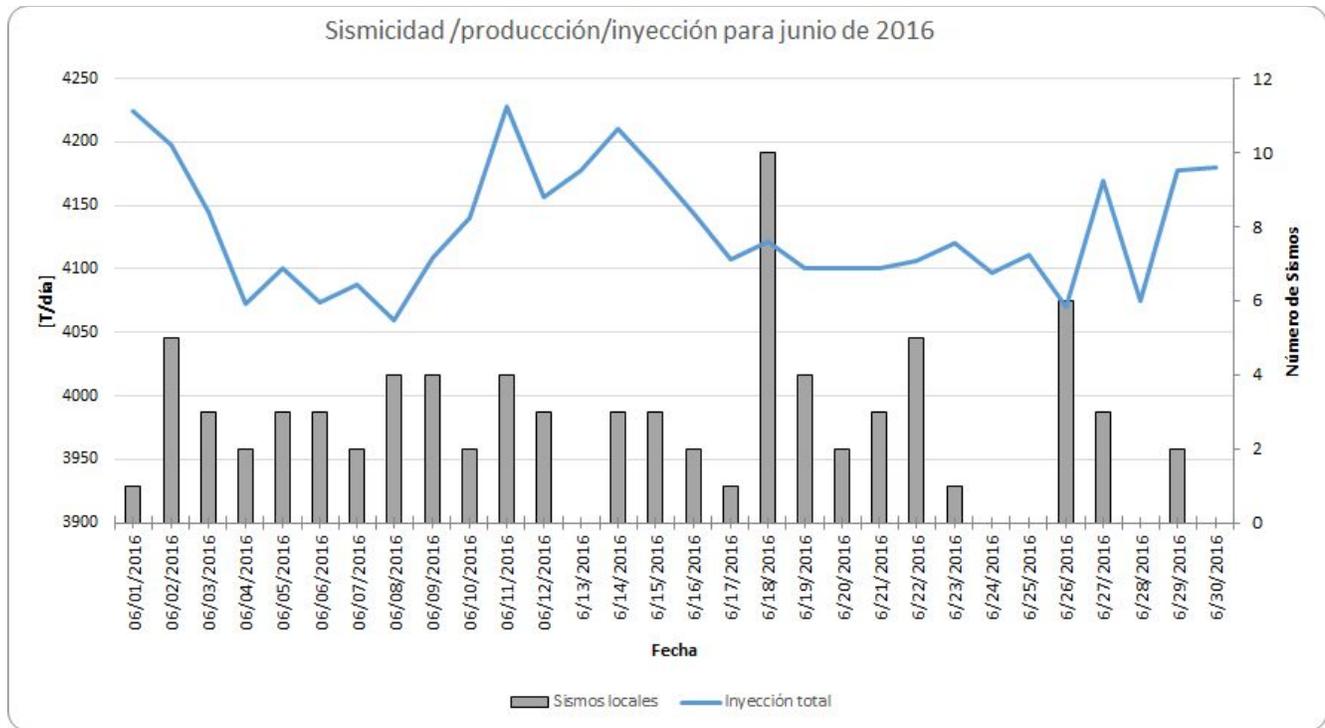


Figura 48: Gráfica de comparación de la inyección total y el número de sismos locales ocurridos en el mes de junio de 2016 en el campo Tres Vírgenes.

Comprobada la importancia del enjambre se procede de nueva cuenta a calcular el mecanismo focal compuesto y ver la interacción que presenta esta sismicidad con el sistema de fallas “Tres Vírgenes”. El mecanismo focal compuesto presentado en la Figura 49 (pelota de playa) nos da la siguiente información: sistema de fallas “Tres Vírgenes”, es una falla oblicua que presenta un rumbo de 271°, un echado de 66° y un ángulo de inclinación de 33°.

2016 6 8 1952 8.0 L 27.515-112.579 5.2 CFE 4 0.1 0.9CCFE
STR DIP RAK Source
271 66 33

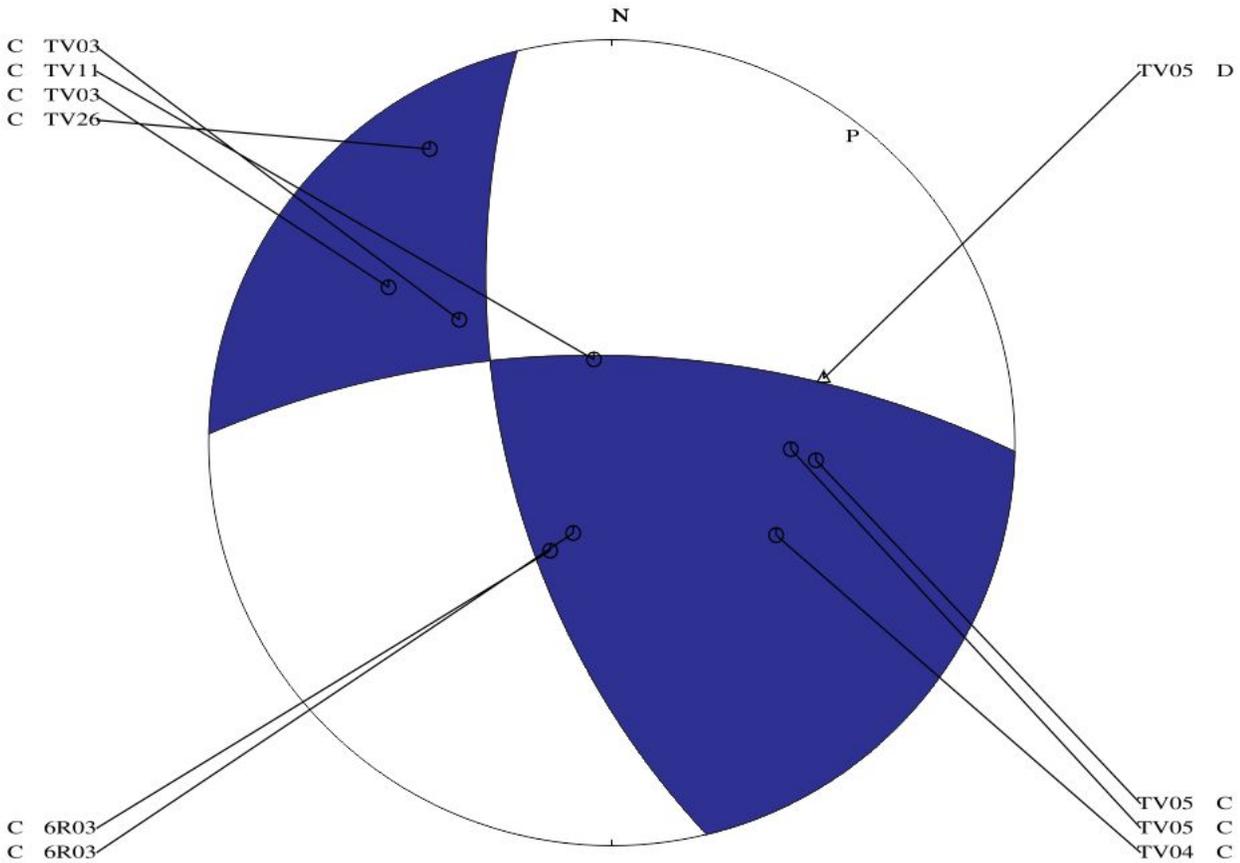


Figura 49: Mecanismo focal compuesto del mes de junio de 2016.

Es importante mencionar que para el año 2016 no se contó con información de producción de los pozos debido a las dificultades para obtener esta información. Dicho esto, la falta de estos datos no ha demostrado ser realmente relevante a los resultados aquí plasmados, debido a que se observó que la producción de los pozos durante los años 2015 y 2016 se mantuvo constante, por lo que se considera que tienen un efecto despreciable en estos casos de estudio.

6.2. Gráficas anuales de sismicidad, producción e inyección.

Para el análisis de este caso se construyeron gráficas comparativas donde se puede observar el gasto de inyección que manejaron los pozos, la cantidad de sismos locales registrados en la zona y si en esas fechas se presentó un sismo de gran magnitud en una zona lejana, todo esto en periodos de un año.

En la figura 50 se muestra la gráfica comparativa del año 2015 para el campo de Tres Vírgenes; se puede observar resaltado en color azul el gasto de inyección en los pozos; en color naranja, la producción que se tuvo; las líneas rojas indican un sismo de gran magnitud en una zona lejana al campo y, en color negro, se puede observar la cantidad de sismos que se registraron y ubican de manera individual en el campo en las fechas indicadas.

Los puntos de interés que resaltan en la gráfica son en los meses de marzo, abril y mayo donde se puede ver con claridad que la sismicidad local tiene un aumento en relación a meses anteriores y que ese mismo aumento se relaciona con los sismos de gran magnitud presentados en otras partes del mundo; de igual forma es sorprendente ver la variación de la sismicidad local a partir del mes de julio donde los gastos de inyección se ven muy modificados a como se tenía acostumbrado, ya sea que se produce un aumento o disminución de la inyección la sismicidad de la zona actúa de la misma forma; por último al observar la producción podemos darnos cuenta que esta se mantuvo constante a lo largo de todo el año por lo que no se puede observar una relación entre esta y la sismicidad del campo geotérmico.

Ahora para el año 2016 (Figura 51), y manejando el mismo sistema de colores en relación a los elementos a analizar en la gráfica del campo, se puede observar cómo durante la mitad del año se mantuvo un gasto de inyección constante junto con una sismicidad local constante con pequeños picos solo en cercanía de tiempo con eventos lejanos; pero, al pasar marzo, el gasto de inyección es reducido casi en 100 (t/h), lo que se ve reflejado en un aumento en la sismicidad local, lo que es un efecto contrario a lo que se esperaba ver. De igual forma, los picos de sismicidad coinciden con la actividad de sismos de gran magnitud en zonas lejanas.

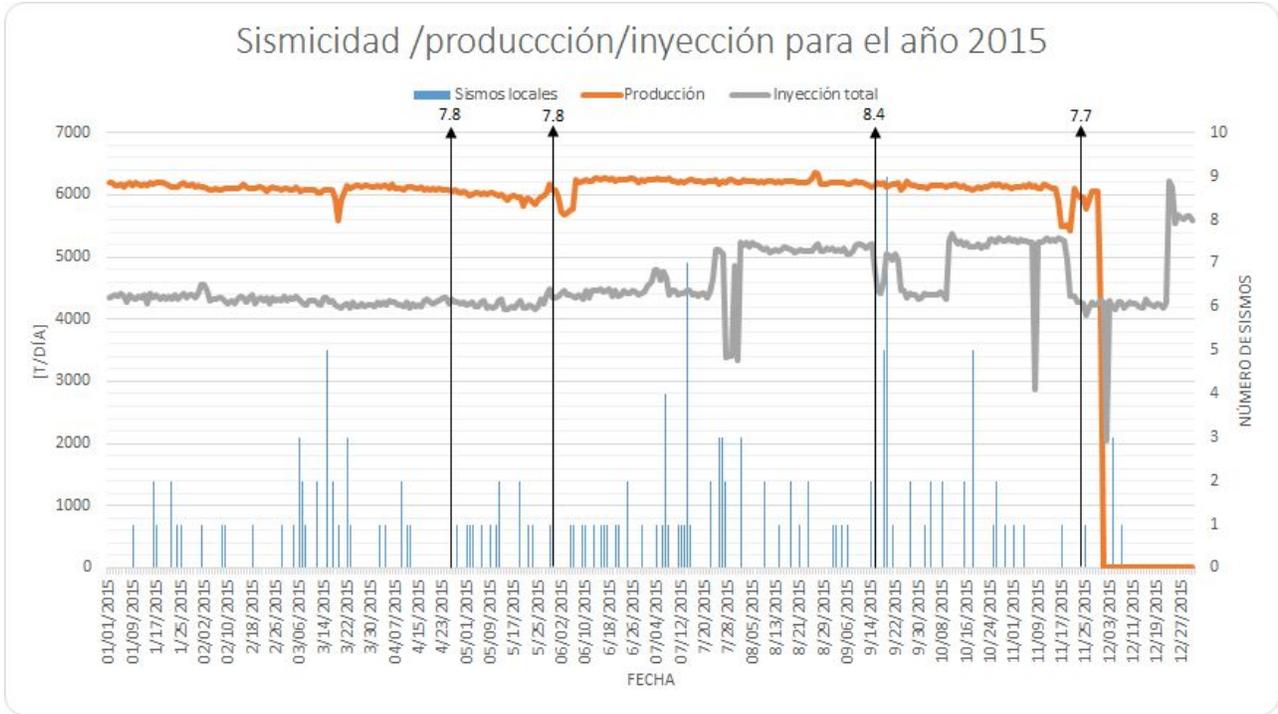


Imagen 50: Gráfica de comparación de los ritmos de producción e inyección de los pozos geotérmicos en Tres Vírgenes comparados con la cantidad de sismos locales ocurridos durante el año 2015.

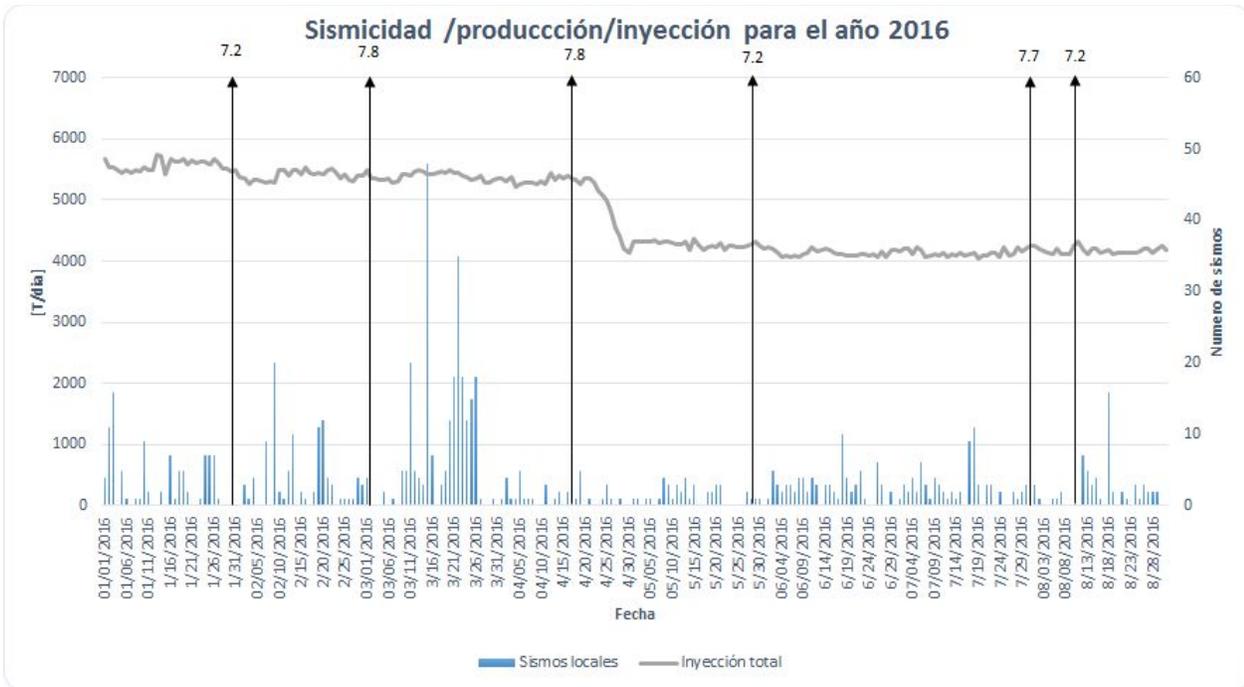


Imagen 51: Gráfica de comparación del ritmo de inyección de agua de los pozos en el campo Tres Vírgenes, comparados con la cantidad de sismos locales ocurridos durante el 2016. Las flechas representan los telesismos ocurridos, acompañados por su magnitud.

6.3. Estadística Beta aplicada.

6.3.1. Campo Los Humeros, Puebla.

La estadística se aplicó en primer lugar a los 5 mega sismos de mayor intensidad ocurridos durante 2017 alrededor del mundo. Para cada uno, se contabilizaron, en primera instancia, los sismos locales ocurridos en el estado de Puebla durante los 30 días posteriores al terremoto (Ti), con un tiempo total de referencia (T) de 60 días (30 días antes y 30 después del terremoto). Este cálculo arrojó resultados en su mayoría insignificantes, seguramente por un tiempo de referencia muy corto. Por esto, para asegurar que la estadística abarque la mayor cantidad de datos posibles, se utilizó como período total de referencia los sismos ocurridos durante la totalidad del catálogo (1990 a 2018). En la tabla 4 se muestran los resultados de ambos cálculos, obteniéndose para este último resultados que indican que todos los megasismos indujeron sismos en el campo geotérmico estudiado.

Fecha	Evento	Ni	Beta	Confiabilidad
12/11/2017	Frontera Irán-Irak (7.3)	8	5.5	99%
07/09/2017	Chiapas, México (8.2)	16	12.12	99%
17/07/2017	Rusia (7.7)	8	5.5	99%
22/01/2017	Nueva Guinea (7.9)	3	1.3	Insignificante
10/01/2017	Filipinas (7.3)	6	3.8	99%

Tabla 4. Estadística beta calculada para los eventos telesísmicos ocurridos durante el 2017, utilizando el calendario de sismos locales registrados en el campo Los Humeros, Puebla.

6.3.2. Campo Tres Vírgenes, Baja California Sur.

Posteriormente, se utilizó el catálogo de sismicidad del SSN para la zona de Baja California Sur, para realizar el mismo procedimiento y observar si existe algún efecto significativo ocasionado por mega eventos ocurridos alrededor del mundo. El catálogo de la zona consta de 1945 sismos ocurridos entre los años de 1990 y 2018. A continuación, se presenta una tabla con los resultados observados para los principales mega-sismos ocurridos durante el año de 2016.

Fecha	Evento	Ni	Beta	Confiabilidad
17/12/2016	Nueva Irlanda (8.0)	18	5.19	99
16/04/2016	Costa de Ecuador (7.8)	14	3.5	99
02/03/2016	Sumatra, Indonesia (7.8)	24	7.7	99
14/11/2016	Nueva zelanda (7.8)	9	1.4	insignificante
09/12/2016	Islas Salomon (7.8)	20	6.03	99

Tabla 5. Estadística beta calculada para los eventos telesísmicos ocurridos durante el 2016, utilizando el calendario de sismos locales registrados en el campo Los Humeros, Puebla.

En primera instancia se puede observar que, de acuerdo con el trabajo de Castro et al., los terremotos de gran magnitud alrededor del mundo ocasionarán un aumento en la sismicidad local de los dos campos geotérmicos estudiados en los días posteriores a estos. Sin embargo, en la investigación realizada pudimos observar que los sismos con epicentros muy alejados no tenían un efecto realmente registrable en el campo. Esto demuestra que la estadística Beta resulta una herramienta superficial que depende de otras variables, por lo que su uso debe realizarse cuando se posea una manera adicional de comprobar los resultados que ésta plantea. Esto abre las puertas a posibles investigaciones futuras a mayor profundidad.

Al observar las estadísticas mencionadas, es posible observar un aumento considerable en la ocurrencia de sismos locales en los periodos en que la inyección de agua aumenta bruscamente. Aunque no resulta evidente en algunas ocasiones, en la mayoría de los casos se presentan muchos más sismos de los que se esperarían en promedio.

Se debe recordar que para conocer la ubicación de los sismos en el campo geotérmicos se monitoreó la zona de interés durante todo el tiempo que abarcamos con una red temporal de sismógrafos ubicados estratégicamente en estaciones a lo largo de todo el campo, después con la construcción de tambores y uso de diversos softwares fue posible conocer la ubicación de cada sismo; de igual forma para ver la influencia de los sismos lejanos se recurrió a usar el método de la estadística BETA, la cual fue alimentada con sismos registrados por el servicio sismológico nacional.

CONCLUSIONES

Una vez finalizada esta tesis y habiendo expuesto todos los factores que se involucran a la hora de detectar, medir, localizar y relacionar la sismicidad inducida en un campo geotérmico en relación con los pozos productores e inyectores, así como con eventos sísmicos de gran magnitud en zonas lejanas, llegamos a las siguientes conclusiones:

1. Se demostró que una variación apreciable en el gasto de inyección en los pozos inyectores, ya sea creciente o decreciente, tiene un alto impacto en la sismicidad local ya que ocasiona una fuerte desestabilización de las estructuras geológicas, las cuales liberan energía en forma de sismos. También se observa que si el pozo inyector se encuentra cerca de una falla, la inyección de los fluidos la activará, produciéndose a través de ellas esta sismicidad inducida. Esto se observa fácilmente en la figura 35, donde un cambio repentino en el gasto genera un gran aumento de sismicidad el día 19 de enero de 2015, justo 5 días después de la reducción de la inyección; estos 5 días son justamente el tiempo de retraso empíricamente esperado para que se refleje un cambio en la sismicidad después de un cambio en la inyección (a partir de trabajos anteriores realizados por Lermo et. al).
2. Los eventos tectónicos de gran magnitud ubicados a grandes cantidades de distancia tienen influencia en la sismicidad registrada en los campos geotérmicos, demostrado en otros campos en los antecedentes de investigación donde se usó la estadística BETA, y para los campos estudiados en esta tesis.
3. Se encontró una relación de los sismos que se utilizaron para esta tesis y la ubicación de los pozos inyectores y los sistemas de fallas como se puede ver con las falla “Las víboras” y los casos de estudio de los meses de septiembre y octubre del año 2015. Cuando existe un pico anormal en la sismicidad local del campo, estos sismos suelen encontrarse alrededor de un pozo de inyección o sobre alguna falla que se encuentre relacionada a el mismo.
4. No fue posible concluir una relación entre los gastos de producción y la sismicidad, debido a que los gastos de producción utilizados en este trabajo se mantuvieron constantes a lo largo de todo el periodo de análisis. Sin embargo, de acuerdo al comportamiento observado con la inyección, es de esperarse que se observe un efecto similar en la sismicidad por un cambio brusco en la producción de líquido.
5. Una vez comprobada la existencia de sismicidad inducida se puede saber o detectar nuevas zonas fracturadas, asociadas a un sistema de fallas activo. Estos serían nuevos lugares donde se presenta un flujo de vapor para la ampliación y perforación de pozos para la producción del campo geotérmico.
6. Debido a estos resultados, se recomienda una mayor observación sobre estas relaciones observadas entre la inyección de líquido y telesismicidad con la sismicidad local, debido a los riesgos que esto puede significar tanto para las estructuras superficiales como las subsuperficiales en caso de no ser tomadas en cuenta. Para esto, sería óptima una mejor

toma de información en las zonas cercanas a los pozos, así como una mejor comunicación entre los grupos de estudio geofísicos, geológicos y de yacimientos con las autoridades de la Comisión Federal de Electricidad encargadas.

7. El conocer que la explotación geotérmica genera sismicidad inducida es un factor importante a la hora de querer desarrollar un nuevo campo o la ampliación de un existente, el conocer los alrededores y la existencia de concentraciones urbanas debe ser un factor a tomar en cuenta para evitar riesgos a la población cercana.

REFERENCIAS

1. Servicio Geológico Mexicano (2018), *Geotermia*, México. Recuperado de: http://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Geotermia.html
2. Bp Energy Economics (2018), Bp Energy Outlook 2018 edition, Recuperado de: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>
3. Rosenblueth, E., García, V., Rojas, T., Nuñez, F., Orozco, J. (1989), *Macrosismos*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
4. Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (2016), *Geotermia en México*, México.
5. Dirección General de Industria, Energía y Minas, Comunidad de Madrid. *Guía de la Energía Geotérmica*, Madrid, España. Recuperado de: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-geotermica.pdf>
6. Geothermal Energy Association (2016), *2016 Annual US Global Geothermal Power Production Report*, Washington DC, USA. Recuperado de: <http://geo-energy.org>
7. Dr. Gerardo Hiriart Le Bert (2017), *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*, México.
8. Perforadora Santa Barbara (2017), *Los Pozos Geotérmicos*, La Libertad, El Salvador.
9. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (2017), *How a Geothermal Power Plant Works*, Washington, DC, USA.
10. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (2017), *Geothermal Electricity Production Basics*, Washington, DC, USA.
11. Blodgett, L., Geothermal Energy Association (2014), *Geothermal Basics*, Washington, DC, USA.
12. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (2017), *How an Enhanced Geothermal System Works*. Washington, DC, USA.
13. *Schlumberger Oilfield Glossary*, glosario en línea de Schlumberger Limited (2018).
14. Universidad de Costa Rica (2011), *Qué significa que un sismo tenga un origen local o de subducción*, Costa Rica,
15. Esg solutions (2018). *¿Qué es la Sismicidad Inducida?* Kingston, Canada.
16. Castillo, J., Fritz, C., *Tipos de Sismógrafos en la actualidad*, Instituto Profesional Santo Tomás, Chile.

17. Arellano, V.M., A. García, R.M. Barragán, G. Izquierdo, A. Aragón y A. Pizano, 2000. Distribución inicial de presión y temperatura del campo geotérmico de Los Humeros. Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas-Comisión Federal de Electricidad, 450 pp.
18. Castro, R., Clayton, R., Hauksson, E. & Stock, J. (2017). *Observations of remotely triggered seismicity in Salton Sea and Coso geothermal regions, Southern California, USA, after big (MW>7.8) teleseismic earthquakes*. Geofísica Internacional 56-3: 269-286.
19. Jiménez, N. (2015), *Sismicidad Inducida Asociada a la Estimulación del Pozo LV-6 del Campo Geotérmico Tres Vírgenes*. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.
20. Macías, J., Jiménez, E., (2013), *Estudio de Estratigrafía y Geología del Complejo Volcánico Tres Vírgenes, B.C.S.*, Geotermia, Vol. 26, No. 1., México.
21. Cronin V (2010). *A Primer on Focal Mechanism Solutions for Geologists*. Baylor University, USA.
22. King, G., Stein, R. & Lin, J. (1994), *Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes*. Bulletin of the Seismology Society of America.

ANEXO 1

A continuación se incluyen las tablas de los gastos de inyección de los pozos utilizados para el estudio de sismicidad inducida en campos geotérmicos. La información plasmada en estas tabla sirvió para construir los gráficos comparativos de sismicidad vs inyección, gracias a esto se pudo discutir que tanta influencia tiene esta actividad con la sismicidad presente en el campo.

Tabla 6: Gastos de inyección en pozo LV-8 para el mes de septiembre de 2015 (CFE).

Fecha de Medición	Tiempo de Medición	Flujo de Salmuera [t/hr]	Flujo Masico [lb/hr]
01/09/2015	08:00:00	-139.4	-307324.028
02/09/2015	09:00:00	-136.82	-301636.108
03/09/2015	10:00:00	-137.9	-304017.098
04/09/2015	11:00:00	-137.2	-302473.864
05/09/2015	12:00:00	-137.12	-302297.494
06/09/2015	13:00:00	-135.05	-297733.931
07/09/2015	14:00:00	-140.27	-309242.047
08/09/2015	15:00:00	-142.32	-313761.518
09/09/2015	16:00:00	-141.58	-312130.1
10/09/2015	17:00:00	-142.11	-313298.548

11/09/2015	18:00:00	-141.1	-311071.882
12/09/2015	19:00:00	-139.56	-307676.767
13/09/2015	20:00:00	-140.92	-310675.05
14/09/2015	21:00:00	-142.06	-313188.317
15/09/2015	22:00:00	-120.78	-266274.004
16/09/2015	23:00:00	-111.11	-244955.328
17/09/2015	00:00:00	-108.91	-240105.164
18/09/2015	01:00:00	-111.12	-244977.374
19/09/2015	02:00:00	-134.96	-297535.515
20/09/2015	03:00:00	-134.56	-296653.667
21/09/2015	04:00:00	-126	-277782.12
22/09/2015	05:00:00	-135.34	-298373.271
23/09/2015	06:00:00	-130.94	-288672.943
24/09/2015	07:00:00	-111.18	-245109.652
25/09/2015	08:00:00	-143.7	-316803.894
26/09/2015	09:00:00	-125.48	-276635.718
27/09/2015	10:00:00	-114.27	-251921.927
28/09/2015	11:00:00	-115.11	-253773.808
29/09/2015	12:00:00	-113.29	-249761.4
30/09/2015	13:00:00	-110.13	-242794.801

Tabla 7: Gastos de inyección en pozo LV-8 para el mes de octubre de 2015 (CFE).

Fecha de Medición	Tiempo de Medición	Flujo de Salmuera [t/hr]	Flujo Masico [lb/hr]
01/10/2015	08:00:00	-181.28	-399653.514
02/10/2015	09:00:00	-184.21	-406113.05
03/10/2015	10:00:00	-183.17	-403820.245
04/10/2015	11:00:00	-154.72	-341098.806

05/10/2015	12:00:00	-163.28	-359970.354
06/10/2015	13:00:00	-153.15	-337637.553
07/10/2015	14:00:00	-125.51	-276701.856
08/10/2015	15:00:00	-115.42	-254457.24
09/10/2015	16:00:00	-106.85	-235563.647
10/10/2015	17:00:00	-152.81	-336887.982
11/10/2015	18:00:00	-160.3	-353400.586
12/10/2015	19:00:00	-156.03	-343986.859
13/10/2015	20:00:00	-155.96	-343832.535
14/10/2015	21:00:00	-149.4	-329370.228
15/10/2015	22:00:00	-147.65	-325512.143
16/10/2015	23:00:00	-169.17	-372955.565
17/10/2015	00:00:00	-143.47	-316296.831
18/10/2015	01:00:00	-141.18	-311248.252
19/10/2015	02:00:00	-140.58	-309925.48
20/10/2015	03:00:00	-107.28	-236511.634
21/10/2015	04:00:00	-103.49	-228156.124
22/10/2015	05:00:00	-104.75	-230933.945
23/10/2015	06:00:00	-103.99	-229258.434
24/10/2015	07:00:00	-108.81	-239884.702
25/10/2015	08:00:00	-108.51	-239223.316
26/10/2015	09:00:00	-121.69	-268280.208
27/10/2015	10:00:00	-177.76	-391893.251
28/10/2015	11:00:00	-177.32	-390923.218
29/10/2015	12:00:00	-177.24	-390746.849
30/10/2015	13:00:00	-165.29	-364401.64

31/10/2015	14:00:00	-103.68	-228575.002
------------	----------	---------	-------------

Tabla 8: Gastos de inyección en pozo LV-8 para el mes de febrero de 2016 (CFE).

Fecha de Medición	Tiempo de Medición	Flujo de Salmuera [t/hr]	Flujo Masico [lb/hr]
01/02/2016	08:00:00	-159.78	-352254.1836
02/02/2016	09:00:00	-158.28	-348947.2536
03/02/2016	10:00:00	-155.41	-342619.9942
04/02/2016	11:00:00	-155.55	-342928.641
05/02/2016	12:00:00	-156.46	-344934.8452
06/02/2016	13:00:00	-156.62	-345287.5844
07/02/2016	14:00:00	-154.08	-339687.8496
08/02/2016	15:00:00	-154.9	-341495.638
09/02/2016	16:00:00	-153.47	-338343.0314
10/02/2016	17:00:00	-164.08	-361734.0496
11/02/2016	18:00:00	-163.48	-360411.2776
12/02/2016	19:00:00	-158.56	-349564.5472
13/02/2016	20:00:00	-162.19	-357567.3178
14/02/2016	21:00:00	-165.08	-363938.6696
15/02/2016	22:00:00	-159.39	-351394.3818
16/02/2016	23:00:00	-161.04	-355032.0048
17/02/2016	00:00:00	-161.54	-356134.3148
18/02/2016	01:00:00	-160.57	-353995.8334
19/02/2016	02:00:00	-164.15	-361888.373
20/02/2016	03:00:00	-159.26	-351107.7812
21/02/2016	04:00:00	-162.62	-358515.3044
22/02/2016	05:00:00	-163.11	-359595.5682
23/02/2016	06:00:00	-160.5	-353841.51

24/02/2016	07:00:00	-156.14	-344229.3668
25/02/2016	08:00:00	-156.48	-344978.9376
26/02/2016	09:00:00	-155.64	-343127.0568
27/02/2016	10:00:00	-155.66	-343171.1492
28/02/2016	11:00:00	-159.8	-352298.276
29/02/2016	12:00:00	-158.83	-350159.7946

Tabla 9: Gastos de inyección en pozo LV-8 para el mes de mayo de 2016 (CFE).

Fecha de Medición	Tiempo de Medición	Flujo de Salmuera [t/hr]	Flujo Masico [lb/hr]
01/05/2016	11:00:00	-112.97	-249055.9214
02/05/2016	12:00:00	-110.07	-242662.5234
03/05/2016	13:00:00	-113.23	-249629.1226
04/05/2016	14:00:00	-109.74	-241934.9988
05/05/2016	15:00:00	-110.82	-244315.9884
06/05/2016	16:00:00	-112.25	-247468.595
07/05/2016	17:00:00	-109.3	-240964.966
08/05/2016	18:00:00	-114.75	-252980.145
09/05/2016	19:00:00	-111.8	-246476.516
10/05/2016	20:00:00	-108.84	-239950.8408
11/05/2016	21:00:00	-109.73	-241912.9526
12/05/2016	22:00:00	-110.25	-243059.355
13/05/2016	23:00:00	-111.98	-246873.3476
14/05/2016	00:00:00	-104.02	-229324.5724
15/05/2016	01:00:00	-111.47	-245748.9914
16/05/2016	02:00:00	-107.79	-237635.9898
17/05/2016	03:00:00	-103.21	-227538.8302
18/05/2016	04:00:00	-108.17	-238473.7454

19/05/2016	05:00:00	-107.3	-236555.726
20/05/2016	06:00:00	-108.03	-238165.0986
21/05/2016	07:00:00	-110.16	-242860.9392
22/05/2016	08:00:00	-104.47	-230316.6514
23/05/2016	09:00:00	-104.7	-230823.714
24/05/2016	10:00:00	-107.39	-236754.1418
25/05/2016	11:00:00	-108.67	-239576.0554
26/05/2016	12:00:00	-108.05	-238209.191
27/05/2016	13:00:00	-110.06	-242640.4772
28/05/2016	14:00:00	-109.51	-241427.9362
29/05/2016	15:00:00	-111.54	-245903.3148
30/05/2016	16:00:00	-108.57	-239355.5934
31/05/2016	17:00:00	-106.97	-235828.2014

Tabla 10: Gastos de inyección en pozo LV-5 para el mes de septiembre de 2015 (CFE).

Fecha de Medición	Tiempo de Medición	Flujo de Salmuera [t/hr]	Flujo Masico [lb/hr]
01/09/2015	08:00:00	-75.05	-165456.731
02/09/2015	09:00:00	-75.05	-165456.731
03/09/2015	10:00:00	-75.05	-165456.731
04/09/2015	11:00:00	-75.05	-165456.731
05/09/2015	12:00:00	-77.03	-169821.8786
06/09/2015	13:00:00	-75.05	-165456.731
07/09/2015	14:00:00	-70.21	-154786.3702
08/09/2015	15:00:00	-70.21	-154786.3702
09/09/2015	16:00:00	-75.05	-165456.731
10/09/2015	17:00:00	-75.05	-165456.731
11/09/2015	18:00:00	-75.05	-165456.731

12/09/2015	19:00:00	-75.05	-165456.731
13/09/2015	20:00:00	-75.05	-165456.731
14/09/2015	21:00:00	-75.05	-165456.731
15/09/2015	22:00:00	-80.08	-176545.9696
16/09/2015	23:00:00	-75.05	-165456.731
17/09/2015	00:00:00	-75.05	-165456.731
18/09/2015	01:00:00	-80.08	-176545.9696
19/09/2015	02:00:00	-75.05	-165456.731
20/09/2015	03:00:00	-75.05	-165456.731
21/09/2015	04:00:00	-80.08	-176545.9696
22/09/2015	05:00:00	-75.05	-165456.731
23/09/2015	06:00:00	-75.05	-165456.731
24/09/2015	07:00:00	-75.05	-165456.731
25/09/2015	08:00:00	-42.26	-93167.2412
26/09/2015	09:00:00	-56	-123458.72
27/09/2015	10:00:00	-70.21	-154786.3702
28/09/2015	11:00:00	-68.33	-150641.6846
29/09/2015	12:00:00	-70.21	-154786.3702
30/09/2015	13:00:00	-70.21	-154786.3702

Tabla 11: Gastos de inyección en pozo LV-5 para el mes de Octubre de 2015 (CFE).

Fecha de Medición	Tiempo de Medición	Flujo de Salmuera [t/hr]	Flujo Masico [lb/hr]
01/10/2015	08:00:00	0	0
02/10/2015	09:00:00	0	0
03/10/2015	10:00:00	0	0
04/10/2015	11:00:00	-27.96	-61641.1752
05/10/2015	12:00:00	-19.4	-42769.628

06/10/2015	13:00:00	-30.17	-66513.3854
07/10/2015	14:00:00	-59.06	-130204.8572
08/10/2015	15:00:00	-67.52	-148855.9424
09/10/2015	16:00:00	-73.09	-161135.6758
10/10/2015	17:00:00	-66.8	-147268.616
11/10/2015	18:00:00	-63.46	-139905.1852
12/10/2015	19:00:00	-64.09	-141294.0958
13/10/2015	20:00:00	-61.26	-135055.0212
14/10/2015	21:00:00	-70.21	-154786.3702
15/10/2015	22:00:00	-68.33	-150641.6846
16/10/2015	23:00:00	-49.17	-108401.1654
17/10/2015	00:00:00	-71.42	-157453.9604
18/10/2015	01:00:00	-73.66	-162392.3092
19/10/2015	02:00:00	-74.68	-164641.0216
20/10/2015	03:00:00	-109.5	-241405.89
21/10/2015	04:00:00	-110.4	-243390.048
22/10/2015	05:00:00	-111.84	-246564.7008
23/10/2015	06:00:00	-110.84	-244360.0808
24/10/2015	07:00:00	-111.53	-245881.2686
25/10/2015	08:00:00	-111.27	-245308.0674
26/10/2015	09:00:00	-96.17	-212018.3054
27/10/2015	10:00:00	-43.58	-96077.3396
28/10/2015	11:00:00	-41.68	-91888.5616
29/10/2015	12:00:00	-42.18	-92990.8716
30/10/2015	13:00:00	-55.97	-123392.5814
31/10/2015	14:00:00	-115.72	-255118.6264

Tabla 12: Gastos de inyección en pozo LV-5 para el mes de febrero de 2016 (CFE).

Measurement Date	Measurement Time	Brine Flow [t/hr]	Mass Flow [lb/hr]
01/02/2016	08:00:00	-64.65	-142528.683
02/02/2016	09:00:00	-64.65	-142528.683
03/02/2016	10:00:00	-64.09	-141294.0958
04/02/2016	11:00:00	-66.17	-145879.7054
05/02/2016	12:00:00	-65.57	-144556.9334
06/02/2016	13:00:00	-64.62	-142462.5444
07/02/2016	14:00:00	-66.26	-146078.1212
08/02/2016	15:00:00	-66.26	-146078.1212
09/02/2016	16:00:00	-66.26	-146078.1212
10/02/2016	17:00:00	-65.15	-143630.993
11/02/2016	18:00:00	-65.28	-143917.5936
12/02/2016	19:00:00	-66.07	-145659.2434
13/02/2016	20:00:00	-66.47	-146541.0914
14/02/2016	21:00:00	-64.03	-141161.8186
15/02/2016	22:00:00	-66.48	-146563.1376
16/02/2016	23:00:00	-69.52	-153265.1824
17/02/2016	00:00:00	-65.69	-144821.4878
18/02/2016	01:00:00	-64.93	-143145.9766
19/02/2016	02:00:00	-62.47	-137722.6114
20/02/2016	03:00:00	-66.99	-147687.4938
21/02/2016	04:00:00	-65.8	-145063.996
22/02/2016	05:00:00	-66.26	-146078.1212
23/02/2016	06:00:00	-66.26	-146078.1212
24/02/2016	07:00:00	-67.21	-148172.5102

25/02/2016	08:00:00	-69.91	-154124.9842
26/02/2016	09:00:00	-66.8	-147268.616
27/02/2016	10:00:00	-65.07	-143454.6234
28/02/2016	11:00:00	-65.38	-144138.0556
29/02/2016	12:00:00	-66.37	-146320.6294

Tabla 13: Gastos de inyección en pozo LV-5 para el mes de febrero de 2016 (CFE).

Fecha de Medición	Tiempo de Medición	Flujo de Salmuera [t/hr]	Flujo Masico [lb/hr]
01/05/2016	11:00:00	-66.82	-147312.7084
02/05/2016	12:00:00	-69.59	-153419.5058
03/05/2016	13:00:00	-66.94	-147577.2628
04/05/2016	14:00:00	-70.61	-155668.2182
05/05/2016	15:00:00	-69.03	-152184.9186
06/05/2016	16:00:00	-68.33	-150641.6846
07/05/2016	17:00:00	-70.21	-154786.3702
08/05/2016	18:00:00	-65.67	-144777.3954
09/05/2016	19:00:00	-68.33	-150641.6846
10/05/2016	20:00:00	-70.13	-154610.0006
11/05/2016	21:00:00	-68.33	-150641.6846
12/05/2016	22:00:00	-68.3	-150575.546
13/05/2016	23:00:00	-67.67	-149186.6354
14/05/2016	00:00:00	-69.89	-154080.8918
15/05/2016	01:00:00	-70.21	-154786.3702
16/05/2016	02:00:00	-70.14	-154632.0468
17/05/2016	03:00:00	-71.27	-157123.2674
18/05/2016	04:00:00	-68.33	-150641.6846
19/05/2016	05:00:00	-69.43	-153066.7666

20/05/2016	06:00:00	-68.33	-150641.6846
21/05/2016	07:00:00	-68.91	-151920.3642
22/05/2016	08:00:00	-70.21	-154786.3702
23/05/2016	09:00:00	-72.13	-159019.2406
24/05/2016	10:00:00	-69.74	-153750.1988
25/05/2016	11:00:00	-67.86	-149605.5132
26/05/2016	12:00:00	-68.33	-150641.6846
27/05/2016	13:00:00	-66.8	-147268.616
28/05/2016	14:00:00	-69.03	-152184.9186
29/05/2016	15:00:00	-68.33	-150641.6846
30/05/2016	16:00:00	-68.33	-150641.6846
31/05/2016	17:00:00	-68.33	-150641.6846

ANEXO 2

En el siguiente anexo se incluyen los sismos locales registrados en los estados de Puebla y Baja California Sur, que fueron utilizados como referencia para la construcción de la estadística beta con el fin de conocer si la sismicidad en los campos geotérmicos que se estudiaron es de origen inducido. Es importante mencionar que toda esta información fue obtenida del Servicio Sismológico Nacional (SSN).

De igual forma se menciona que debido a la gran cantidad de sismos detectados en la zona es imposible poner todos en este anexo, sólo se incluyen los últimos registrados para no saturar el trabajo con tablas.

MC	FECHA	EPICENTRO	PROF.
3.6	2018-03-31 05:34:32	21 km al SUR de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.11°, -98.58°	50 km
3.5	2018-03-27 16:23:24	25 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.13°, -98.76°	50 km
2.6	2018-03-19 09:38:50	16 km al NOROESTE de ATLIXCO, PUE : 18.97°, -98.57°	3 km
2.9	2018-03-13 10:33:47	9 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.18°, -98.13°	51 km
3.6	2018-03-09 09:10:39	35 km al SURESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.0°, -98.5°	55 km

3.1	2018-03-06 01:10:05	16 km al OESTE de ATLIXCO, PUE : 18.92°, -98.59°	5 km
3.1	2018-02-13 10:57:54	35 km al ESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.12°, -97.72°	54 km
4	2018-02-12 02:40:54	16 km al SUROESTE de S GABRIEL CHILAC, PUE : 18.24°, -97.47°	66 km
3.6	2018-02-11 12:50:11	39 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 17.97°, -98.32°	51 km
3.4	2018-02-11 11:44:57	26 km al NOROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.37°, -98.22°	52 km
3.4	2018-02-09 00:19:26	33 km al SUROESTE de S GABRIEL CHILAC, PUE : 18.22°, -97.64°	56 km
3.4	2018-02-08 01:17:39	24 km al SURESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.06°, -97.88°	52 km
3.9	2018-02-05 01:31:49	21 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.1°, -98.22°	49 km
3.6	2018-02-02 23:09:15	16 km al NORESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.32°, -97.96°	56 km
3.1	2018-01-26 21:13:35	22 km al SURESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.25°, -98.41°	48 km
4	2018-01-21 18:30:03	26 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.12°, -98.76°	47 km
3.8	2018-01-21 06:50:59	16 km al ESTE de LIBRES, PUE : 19.43°, -97.54°	48 km
2.6	2018-01-16 07:19:39	7 km al NOROESTE de ATLIXCO, PUE : 18.97°, -98.47°	5 km
3	2018-01-16 06:53:19	15 km al NOROESTE de ATLIXCO, PUE : 18.96°, -98.57°	6 km
3.5	2018-01-13 04:16:05	8 km al ESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.19°, -97.97°	54 km
3	2018-01-10 11:19:12	9 km al OESTE de ATLIXCO, PUE : 18.9°, -98.53°	3 km
3.7	2018-01-07 17:53:26	11 km al SUROESTE de ATLIXCO, PUE : 18.82°, -98.47°	36 km
3.5	2018-01-05 22:29:25	30 km al SUR de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.04°, -98.67°	52 km
3.2	2018-01-03 06:39:40	22 km al OESTE de ATLIXCO, PUE : 18.87°, -98.64°	3 km
3.5	2018-01-01 00:50:14	31 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.18°, -98.87°	16 km
3.6	2017-12-31 06:17:59	4 km al NORESTE de IZUCAR DE MATAMOROS, PUE : 18.62°, -98.43°	10 km
3.5	2017-12-29 23:13:37	1 km al ESTE de AJALPAN, PUE : 18.37°, -97.25°	61 km
3.2	2017-12-29 10:17:49	30 km al SUR de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 17.94°, -98.07°	59 km
3.7	2017-12-28 23:15:17	25 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.02°, -98.18°	52 km
2.9	2017-12-27 19:58:19	15 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.11°, -98.15°	48 km
3.3	2017-12-24 22:17:32	11 km al SURESTE de S GABRIEL CHILAC, PUE : 18.23°, -97.3°	62 km
3.4	2017-12-24 06:25:12	19 km al SUROESTE de ATLIXCO, PUE : 18.82°, -98.6°	3 km
2.4	2017-12-24 06:24:20	19 km al SUROESTE de ATLIXCO, PUE : 18.82°, -98.6°	3 km

2.8	2017-12-24 04:38:37	19 km al SUROESTE de ATLIXCO, PUE : 18.83°, -98.6°	3 km
3.2	2017-12-19 19:11:11	13 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.15°, -98.16°	53 km
3.8	2017-12-15 04:56:46	25 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 17.99°, -98.12°	55 km
3.3	2017-12-10 04:28:58	36 km al SUROESTE de S GABRIEL CHILAC, PUE : 18.13°, -97.63°	59 km
3.3	2017-12-08 08:45:35	9 km al ESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.21°, -97.96°	55 km
3.6	2017-11-25 05:43:43	40 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 17.96°, -98.74°	56 km
3.9	2017-11-23 19:29:50	22 km al SURESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.12°, -98.53°	51 km
3.3	2017-11-22 06:48:42	28 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.19°, -98.85°	13 km
3.6	2017-11-18 09:59:49	37 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 17.9°, -98.19°	10 km
3.3	2017-11-18 01:43:08	31 km al SURESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.03°, -98.52°	56 km
3.6	2017-11-18 01:21:54	5 km al NOROESTE de IZUCAR DE MATAMOROS, PUE : 18.64°, -98.48°	32 km
2.8	2017-11-06 05:38:14	1 km al NORESTE de S RAFAEL TLANALAPAN, PUE : 19.29°, -98.46°	9 km
3.2	2017-11-06 03:38:10	5 km al SUROESTE de STA MARIA MOYOTZINGO, PUE : 19.22°, -98.44°	5 km
3.6	2017-11-04 23:39:54	37 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.05°, -98.84°	5 km
4.3	2017-11-01 14:48:04	6 km al SUR de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.25°, -98.6°	52 km
3.6	2017-10-30 22:32:46	42 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.1°, -98.94°	73 km
2.6	2017-10-29 08:04:58	9 km al NOROESTE de ATLIXCO, PUE : 18.95°, -98.51°	11 km
3.6	2017-10-27 13:06:18	40 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 17.97°, -98.75°	47 km
3.5	2017-10-24 04:42:33	9 km al NORESTE de IZUCAR DE MATAMOROS, PUE : 18.66°, -98.4°	15 km
3.8	2017-10-24 03:55:24	9 km al NORESTE de IZUCAR DE MATAMOROS, PUE : 18.66°, -98.41°	16 km
3.6	2017-10-24 02:02:05	44 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.05°, -98.93°	43 km
3.7	2017-10-21 15:29:03	20 km al SURESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.19°, -98.46°	50 km
3.2	2017-10-21 10:54:30	9 km al NORESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.24°, -97.97°	47 km
3.8	2017-09-29 12:02:23	9 km al NOROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.36°, -98.66°	51 km
3.4	2017-09-21 23:04:58	10 km al SURESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.25°, -98.52°	48 km
3.6	2017-09-21 16:33:54	7 km al NOROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.34°, -98.65°	53 km
3.1	2017-09-20 19:27:49	10 km al ESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.32°, -98.51°	36 km
3.6	2017-09-20 07:22:30	48 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 17.97°, -98.9°	55 km

3	2017-09-20 04:42:51	6 km al OESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.31°, -98.66°	50 km
3.5	2017-09-20 04:18:23	37 km al SUR de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 17.97°, -98.68°	50 km
3.2	2017-09-20 02:53:31	12 km al NOROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.38°, -98.68°	58 km
3.5	2017-09-19 17:33:31	7 km al NOROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.36°, -98.63°	54 km
3	2017-09-19 15:49:45	3 km al NORESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.32°, -98.58°	51 km
2.8	2017-09-19 14:44:27	10 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.25°, -98.68°	60 km
3.8	2017-09-19 13:55:15	4 km al NORTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.33°, -98.61°	54 km
4	2017-09-19 13:38:11	12 km al NOROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.36°, -98.69°	66 km
3.4	2017-09-19 13:29:15	10 km al NORTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.38°, -98.61°	32 km
3.8	2017-09-18 15:56:42	25 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 17.99°, -98.11°	56 km
3.5	2017-09-07 14:12:45	21 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.07°, -98.2°	51 km
3.6	2017-09-01 08:20:55	40 km al SURESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 17.98°, -98.42°	49 km
3.4	2017-08-30 03:53:11	30 km al SURESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.08°, -97.79°	59 km
4.2	2017-08-28 00:41:49	29 km al SUROESTE de S GABRIEL CHILAC, PUE : 18.22°, -97.61°	61 km
3.5	2017-08-21 16:23:35	41 km al ESTE de AJALPAN, PUE : 18.47°, -96.89°	79 km
3.3	2017-08-21 05:26:58	25 km al OESTE de S GABRIEL CHILAC, PUE : 18.27°, -97.58°	57 km
3.8	2017-08-18 15:53:12	23 km al SUR de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.09°, -98.63°	53 km
3.6	2017-08-16 18:00:15	4 km al NORESTE de ACATZINGO DE HIDALGO, PUE : 19.0°, -97.75°	10 km
3.3	2017-08-16 13:33:49	12 km al SUR de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.19°, -98.62°	40 km
3.9	2017-08-11 15:38:13	1 km al SURESTE de PALMARITO TOCHAPAN, PUE : 18.89°, -97.63°	101 km
3.1	2017-07-28 01:48:23	11 km al SURESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.16°, -97.95°	60 km
3.1	2017-07-25 22:34:47	13 km al SURESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.12°, -97.95°	57 km
3.1	2017-07-21 22:39:13	37 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 17.88°, -98.14°	54 km
3.3	2017-07-20 23:41:28	33 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.01°, -98.69°	41 km
3.2	2017-07-20 08:58:29	30 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.03°, -98.27°	50 km
3.8	2017-07-07 16:20:08	28 km al SURESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.16°, -98.38°	47 km
3.4	2017-07-06 05:00:32	29 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.07°, -98.72°	34 km
3.7	2017-06-16 01:53:50	13 km al SUROESTE de TEHUACAN, PUE : 18.39°, -97.49°	66 km

4	2017-06-13 17:34:23	25 km al NORESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.3°, -97.84°	57 km
2.7	2017-06-07 01:13:37	9 km al NOROESTE de HUEJOTZINGO, PUE : 19.2°, -98.48°	5 km
3.3	2017-05-28 10:07:44	22 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.11°, -98.24°	51 km
3.6	2017-05-26 09:33:30	38 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 17.93°, -98.27°	54 km
3.3	2017-05-23 21:02:24	15 km al OESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.18°, -98.19°	52 km
3.4	2017-05-23 05:42:26	33 km al ESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.21°, -97.74°	57 km
3.5	2017-05-19 09:20:49	20 km al SURESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.04°, -97.96°	55 km
3.8	2017-05-15 14:09:44	29 km al SUROESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE : 18.1°, -98.29°	47 km
3.5	2017-05-10 01:39:27	36 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.15°, -98.91°	20 km
3.9	2017-05-09 13:34:49	37 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.15°, -98.92°	24 km
3.2	2017-05-09 02:52:53	23 km al SURESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE : 18.12°, -98.49°	52 km

Tabla 14: Sismicidad local registrada en el estado de Puebla durante el año 2017 y 2018 (SSN).

MC	FECHA	EPICENTRO	PROF.
3.9	2018-04-02 03:07:14	83 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.67°, -110.94°	10 km
3.7	2018-03-29 23:01:48	72 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.94°, -112.0°	2 km
4.2	2018-03-28 01:50:33	193 km al SURESTE de CABO SAN LUCAS, BCS : 21.3°, -109.15°	10 km
3.6	2018-03-27 01:00:15	76 km al ESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.48°, -111.51°	16 km
2.8	2018-03-24 21:56:42	66 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.86°, -111.94°	5 km
3.6	2018-03-24 19:02:33	67 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.67°, -111.7°	10 km
2.7	2018-03-23 23:16:07	63 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.82°, -111.93°	8 km
3.5	2018-03-23 19:21:03	67 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.88°, -111.96°	5 km
3.6	2018-03-13 10:28:02	68 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.9°, -112.01°	10 km
4.2	2018-03-13 10:18:47	69 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.89°, -111.93°	10 km
3.2	2018-03-13 10:17:24	63 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.82°, -111.93°	10 km
3.5	2018-03-13 09:06:34	64 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.84°, -111.93°	10 km
3.5	2018-03-09 20:27:09	26 km al SURESTE de LA PAZ, BCS : 24.01°, -110.1°	12 km
3.7	2018-03-08 06:57:38	102 km al NORTE de LORETO, BCS : 26.91°, -111.1°	5 km
3.9	2018-03-02 17:41:56	75 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.99°, -112.07°	15 km

4.5	2018-03-01 18:23:16	134 km al NORESTE de SAN JOSE DEL CABO, BCS : 24.07°, -108.97°	10 km
4.2	2018-02-28 12:25:27	99 km al SURESTE de LORETO, BCS : 25.66°, -110.43°	5 km
3.5	2018-02-23 17:24:40	73 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.56°, -111.57°	10 km
3.4	2018-02-23 14:27:54	73 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.54°, -111.56°	12 km
4.3	2018-02-22 09:03:20	170 km al SURESTE de SAN JOSE DEL CABO, BCS : 22.16°, -108.37°	5 km
3.4	2018-02-18 16:15:22	74 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.6°, -111.58°	10 km
4	2018-02-18 16:08:40	74 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.54°, -111.55°	5 km
4.2	2018-02-17 04:49:01	182 km al SURESTE de SAN JOSE DEL CABO, BCS : 22.1°, -108.27°	16 km
4.3	2018-02-16 07:47:04	135 km al ESTE de LA PAZ, BCS : 24.13°, -108.98°	10 km
3.6	2018-02-15 13:30:31	79 km al NORTE de SANTA ROSALIA, BCS : 28.05°, -112.3°	10 km
3.3	2018-02-14 23:32:30	26 km al SURESTE de LA PAZ, BCS : 24.02°, -110.09°	10 km
3	2018-02-14 22:52:49	28 km al SURESTE de LA PAZ, BCS : 23.96°, -110.12°	10 km
4	2018-02-13 04:03:45	382 km al SUR de CABO SAN LUCAS, BCS : 19.53°, -109.09°	10 km
3.7	2018-02-06 13:46:50	97 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.85°, -111.04°	10 km
3.7	2018-01-31 20:33:17	84 km al NORTE de SANTA ROSALIA, BCS : 28.1°, -112.32°	10 km
3.7	2018-01-31 14:31:20	90 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 28.1°, -111.97°	7 km
3.9	2018-01-28 04:24:08	68 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.55°, -111.02°	10 km
4.2	2018-01-28 02:26:26	65 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.27°, -110.77°	10 km
3.6	2018-01-27 00:38:18	96 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.82°, -110.99°	10 km
4.4	2018-01-26 13:54:19	90 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.78°, -111.05°	10 km
4	2018-01-26 00:12:35	77 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.62°, -110.97°	10 km
2.7	2018-01-21 06:48:11	39 km al NORTE de LORETO, BCS : 26.36°, -111.3°	17 km
4.3	2018-01-21 03:35:30	90 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.74°, -110.95°	10 km
3.7	2018-01-21 01:13:32	65 km al NORTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.92°, -112.24°	58 km
3.6	2018-01-20 21:43:23	73 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.56°, -110.94°	10 km
3.9	2018-01-20 08:49:04	96 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.76°, -110.86°	10 km
3.8	2018-01-20 08:35:12	85 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.73°, -111.03°	10 km
4.6	2018-01-20 07:48:57	76 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.63°, -111.01°	15 km

3.8	2018-01-20 06:29:18	91 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.75°, -110.94°	10 km
3.9	2018-01-20 06:01:14	91 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.76°, -110.97°	10 km
4.1	2018-01-20 02:55:09	94 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.79°, -110.95°	10 km
3.9	2018-01-20 02:48:39	77 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.52°, -110.81°	10 km
4.1	2018-01-19 22:46:14	82 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.64°, -110.9°	16 km
4.3	2018-01-19 20:56:26	83 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.64°, -110.89°	7 km
3.3	2018-01-19 16:23:18	101 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.83°, -110.89°	16 km
3.1	2018-01-19 13:20:42	93 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.78°, -110.99°	16 km
3.6	2018-01-19 12:17:37	94 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.78°, -110.94°	18 km
3.2	2018-01-19 11:29:46	96 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.81°, -110.97°	16 km
4.1	2018-01-19 11:05:28	85 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.68°, -110.93°	10 km
4.7	2018-01-19 10:48:31	87 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.68°, -110.88°	11 km
3.4	2018-01-19 10:44:06	96 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.76°, -110.85°	8 km
4.1	2018-01-19 10:40:11	76 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.56°, -110.88°	16 km
4.2	2018-01-19 10:28:33	74 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.62°, -111.04°	16 km
6.3	2018-01-19 10:17:45	76 km al NORESTE de LORETO, BCS : 26.66°, -111.1°	16 km
3.9	2018-01-13 14:28:56	71 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.94°, -112.02°	10 km
3.3	2018-01-12 20:27:47	61 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.69°, -111.79°	15 km
3.4	2018-01-03 23:09:35	67 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.68°, -111.71°	5 km
3.5	2017-12-30 18:01:23	67 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.65°, -111.69°	5 km
3.7	2017-12-30 12:17:55	50 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.69°, -111.95°	77 km
3.2	2017-12-29 15:19:07	71 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.92°, -111.96°	5 km
3.4	2017-12-25 05:36:58	55 km al SUROESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 26.9°, -112.51°	5 km
4.3	2017-12-22 03:56:34	377 km al SURESTE de CABO SAN LUCAS, BCS : 19.65°, -108.8°	5 km
3.6	2017-12-21 20:27:54	68 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.64°, -111.67°	5 km
3.5	2017-12-20 07:43:19	72 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.54°, -111.58°	6 km
2.9	2017-12-19 19:19:11	71 km al NORTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.96°, -112.11°	5 km
3.6	2017-12-15 06:24:07	93 km al NOROESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 28.15°, -112.52°	10 km

3.5	2017-12-10 09:03:59	74 km al ESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.5°, -111.54°	10 km
3.8	2017-12-09 10:13:56	156 km al ESTE de SAN JOSE DEL CABO, BCS : 23.11°, -108.18°	16 km
4	2017-12-09 03:44:52	165 km al ESTE de SAN JOSE DEL CABO, BCS : 22.81°, -108.12°	16 km
3.7	2017-12-04 17:17:43	74 km al NORTE de SANTA ROSALIA, BCS : 28.0°, -112.18°	10 km
3.5	2017-12-01 22:50:12	68 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.6°, -111.64°	10 km
2.8	2017-12-01 15:13:08	66 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.69°, -111.73°	6 km
4.2	2017-11-27 21:24:37	66 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.66°, -111.7°	10 km
3.7	2017-11-27 09:03:48	66 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.68°, -111.71°	10 km
3.7	2017-11-27 09:02:28	66 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.66°, -111.7°	10 km
3.8	2017-11-27 02:55:03	66 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.65°, -111.7°	10 km
3.8	2017-11-26 16:57:00	71 km al NORTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.97°, -112.13°	10 km
3.9	2017-11-26 02:44:24	135 km al NORESTE de SAN JOSE DEL CABO, BCS : 24.0°, -108.87°	10 km
3.7	2017-11-26 02:27:43	61 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.83°, -112.0°	10 km
3.5	2017-11-25 06:31:42	82 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 28.0°, -111.89°	16 km
4.3	2017-11-25 01:18:50	69 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.75°, -111.74°	6 km
3.5	2017-11-22 07:38:15	71 km al NORTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.98°, -112.21°	15 km
3.6	2017-11-13 16:40:34	61 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.81°, -111.95°	15 km
3.7	2017-11-12 15:22:34	65 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.67°, -111.73°	10 km
3.8	2017-11-08 22:20:56	68 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.74°, -111.75°	10 km
3.8	2017-10-29 04:23:25	63 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.67°, -111.75°	5 km
4	2017-10-29 03:54:11	64 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.64°, -111.72°	5 km
3.6	2017-10-29 01:21:16	61 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.71°, -111.81°	5 km
3.7	2017-10-25 10:23:56	72 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.58°, -111.59°	10 km
3.7	2017-10-07 00:42:34	115 km al NORESTE de LA PAZ, BCS : 24.81°, -109.44°	16 km
4.1	2017-10-05 15:11:49	59 km al NORESTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.62°, -111.76°	9 km
4.2	2017-10-04 14:37:21	125 km al NORESTE de SAN JOSÉ DEL CABO, BCS : 23.82°, -108.8°	10 km
3.5	2017-09-30 22:14:46	81 km al NORTE de SANTA ROSALIA, BCS : 28.07°, -112.31°	15 km
3.9	2017-09-30 04:58:33	81 km al NORTE de SANTA ROSALIA, BCS : 28.07°, -112.3°	3 km

3.5	2017-09-30 04:57:52	72 km al NORTE de SANTA ROSALIA, BCS : 27.98°, -112.16°	5 km
-----	---------------------	---	------

Tabla 15: Sismicidad local registrada en el estado de B.C.S. durante el año 2017 y 2018 (SSN).