



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**“CIENCIAS DE LA TIERRA”**

**UNIDAD TICOMÁN**

**“SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA  
ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO  
GEOTÉRMICO TRES VIRGENES”**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO GEOFÍSICO**

**P R E S E N T A:**

**NALLELY JIMÉNEZ MÉNDEZ**

**ASESORES:**

**M. EN C. LEOBARDO SALAZAR PEÑA (INTERNO)**

**M. EN C. JAVIER F. LERMO SAMANIEGO (EXTERNO)**

**MÉXICO, D.F. SEPTIEMBRE 2015**



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, con residencia en el campo de Las Tres Vírgenes, a través de los estudios y monitoreo de la actividad sísmica pasiva, durante los periodos 2009 al 2010 por el apoyo otorgado en la realización de esta tesis, permitiendo el uso de los datos propiedad de la empresa e información relacionada directamente con los campos geotérmicos de México.

En el presente trabajo de tesis primeramente me gustaría agradecer a Dios por bendecirme y darme la fortaleza y salud para llegar hasta donde he llegado, para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

De forma muy especial a *mis padres* por la confianza y todo el apoyo a lo largo no solo de mi carrera sino de toda mi vida, ustedes siempre han estado allí y me han ayudado en todo momento de mi vida, en lo bueno, lo malo y lo feo. Sería interminable escribir cuán agradecida estoy por ser su hija. Sé que no soy perfecta, que no siempre hago lo que se supone, cuando se supone, y no tengo el mejor tono. Les agradezco por amarme aún en los momentos más difíciles. Aunque no lo demuestre mucho ustedes significan mucho para mí, y espero que algún día se sientan orgullosos de mí. Gracias por impulsarme y hacer de mí la persona que soy hoy.

Al *Instituto Politécnico Nacional* por permitirme realizar mis estudios, a la *ESIA-Ticomán* por darme la oportunidad de prepararme profesionalmente en la carrera de Ingeniería Geofísica.

A la *Universidad Nacional Autónoma de México*, en especial al Instituto de Ingeniería, por brindarme la beca de estudios, gracias a la cual pude terminar el presente trabajo de licenciatura en esta prestigiosa Universidad.

De manera especial, a mi asesor de tesis, *M. en C. Javier Francisco Lermo Samaniego*, por brindarme su tiempo, sus enseñanzas, su experiencia, consejos y sobre todo su paciencia y motivación para llevar a buen término la presente tesis.

A *M. en C. Yanet Antayhua Vera*, por el apoyo, la paciencia y todas las enseñanzas adquiridas en presente trabajo ya que más que una compañera ha sido una gran amiga.

También me gustaría agradecer a todos mis profesores durante toda mi carrera profesional, porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación, gracias por sus conocimientos y enseñanzas me fue posible el término de la carrera.

A mi amigo *Roberto Morales* no solo por el apoyo que siempre me ha brindado, sino también por todos esos momentos de alegría, risas y sarcasmos ya que gracias a eso la carrera menos pesada, pero también por los momentos malos y tristes, puesto que a pesar de todos los problemas ahí estas siempre, porque a pesar de todo siempre tienes una sonrisa que dar.

A mi madrina *Lucero Quinto*, ya que es como una segunda madre para mí, gracias por preocuparte, por el apoyo, las pláticas y los momentos que pasamos, gracias por ser más que mi madrina, gracias por ser mi amiga.

A mis amigos Consuelo, David, Rudy, Fabiola, Julio, Alma, Juan, Miguel, Javier por todos los buenos momentos, por los ánimos, comprensión que me han brindado a lo largo de la carrera.

También al *INEGI* por proporcionarme la información y los datos necesarios para la realización del presente trabajo.

*NALLELY JIMÉNEZ MÉNDEZ*



# CONTENIDO

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
OBJETIVOS Y ALCANCES .....	III
DESARROLLO DEL TRABAJO.....	IV
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Sismicidad Inducida.....	6
1.1.1 Sismicidad Inducida Por El Fluido.....	7
1.1.2 Monitoreo Microsísmico De Inyección De Fluido En Campos Geotérmicos.....	8
1.1.3 Antecedentes De Sismicidad Inducida En El Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla, México.....	9
1.1.4. Antecedentes De Sismicidad Inducida En El Campo Geotérmico Tres Vírgenes. B.C.S. ....	11
Capítulo 2 GENERACIÓN DE CAMPOS GEOTÉRMICOS .....	15
2.1 Localización .....	15
2.2 Ambiente Tectónico Y Geología Regional .....	16
2.3 Manejo Y Operación Del Campo Geotérmico De Las Tres Vírgenes B.C.S. ....	18
2.3.1 Reservorio Líquido Dominante.....	20
2.3.2 Pozos .....	20
2.4 El Pozo Productor LV-6.....	21
2.4.1 Procesos De Perforación Y Estimulación Ácida Del Pozo LV-6.....	23
Capítulo 3 PROCESAMIENTO DE DATOS .....	26
3.1 Metodología .....	26
3.1.1 Selección Y Estadística De Eventos.....	26
3.1.2 Correlación De Estadística Con Los Procesos De Perforación Y Estimulación Ácida Del Pozo .....	31
3.2 Procesamiento Y Localización De Los Eventos Sísmicos .....	34
3.2.1 Programa De Localización .....	34
3.2.2 Modelo De Velocidad .....	36
3.2.3 Ecuación Para El Cálculo De La Magnitud De Duración .....	36
3.2.4 Localización Hipocentral .....	36
3.3 Análisis De La Distribución De Los Eventos Localizados En Planta Y Profundidad .....	41
3.3.1 Distribución En Planta Y Profundidad .....	41
Capítulo 4 FORMAS DE ONDA Y ANÁLISIS ESPECTRAL.....	53
4.1 Metodología .....	53
4.2 Análisis De Formas De Onda Y Espectros De Frecuencia De Los Grupos A y B.....	54

4.3 Comparación Entre Eventos Inducidos En El Proceso De Inducción Ácida Y Eventos Tectónicos .....	59
4.4 Parámetros De Fuente .....	62
4.4.1 Modelado De La Fuente. ....	62
4.4.2 Aplicación Del Modelo. ....	63
4.4.3 Parámetros De Fuente Obtenidos.....	66
Capítulo 5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	74
ANEXO A.....	77
Bibliografías.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Mapa de la República Mexicana que muestra los campos geotérmicos de México. ....	5
<b>Figura 1.2</b> Ejemplo del fracturamiento hidráulico. ....	7
<b>Figura 1.3</b> Correlación de la cantidad de inyección de agua en los pozos I29 e I38 Vs los números de sismos registrados en la estación S05. ....	10
<b>Figura 1.4</b> Muestra la sismicidad registrada en la estación S06 y la cantidad de producción de vapor, observada principalmente en los 8 pozos. ....	11
<b>Figura 1.5</b> Ubicación de la Zona de estudio: El complejo Volcánico Tres vírgenes desde Google. ....	13
<b>Figura 2.1</b> Mapa que muestra los tres centro volcánicos más importantes de la Región (Macías, 2012) .....	15
<b>Figura 2.2</b> Mapa Geológico Regional del Campo Geotérmico Tres Vírgenes (Macías; 2012) .....	17
<b>Figura 2.3</b> Modelo de un campo geotérmico. ....	19
<b>Figura 2.4</b> (a) Correlación columna litológica y pozos circundantes; (b) Columna litológica del pozo LV-6. ...	22
<b>Figura 2.5</b> Gráfica que muestra la producción del pozo LV-6, en la cual muestra los procesos mencionados anteriormente en la Tabla 2-2. ....	25
<b>Figura 3.1</b> Mapa que muestra el Campo Geotérmico, ubicación del pozo, y las estaciones más cercanas. ....	26
<b>Figura 3.2</b> Tambor de la estación TV01. Se han encerrado en círculos rojos los eventos visiblemente identificados para su posterior procesamiento. ....	27
<b>Figura 3.3</b> Muestra la secuencia de eventos en una hora del día 25/12/2009 en la cual se puede observar los eventos de menor amplitud junto con su espectrograma. ....	29
<b>Figura 3.4</b> Muestra toda la sismicidad registrada en nuestro periodo de interés en nuestra estación diagnóstico TV01, mostrando en la sombra el periodo donde no se registró información de dicha estación. ....	30
<b>Figura 3.5</b> Gráfica que muestra la relación del proceso de perforación, pruebas de simulación, acidificación, de válvulas e integración a la producción del pozo LV06 Vs la sismicidad local diaria cuantificada en la estación TV01 (la Residencia). ....	33
<b>Figura 3.6</b> Muestra un ejemplo de la lectura de los tiempos de onda P, S y coda del sismo registrado el día 19 de Diciembre del 2009 a las 17:00hrs registrado en 4 estaciones. ....	35
<b>Figura 3.7</b> Consola del programa de localización Seisan, donde muestra los eventos de diciembre del 2009 el cual muestra su localización (latitud y longitud), profundidad y Magnitud. ....	37
<b>Figura 3.8</b> Zona de estudio sombreada en color verde, tomando en cuenta los eventos dentro de la misma del periodo abril a diciembre 2009. ....	38
<b>Figura 3.9</b> Gráfica que muestra la relación del proceso de perforación, pruebas de simulación, acidificación, de válvulas e integración a la producción del pozo LV-6 Vs la sismicidad local diaria cuantificada en la estación TV01, así como los tres periodos seleccionados. ....	42
<b>Figura 3.10</b> Muestra a detalle los procesos realizados del 16 al 31 de Diciembre 2009, que abarca el procesos de simulación, mostrando los eventos localizados (barras rojas) y los eventos registrados (barras azules). ..	43
<b>Figura 3.11</b> Esquema en epimap que muestra toda la sismicidad desde Junio del 2009 a Mayo del 2010, además del límite de nuestra área de estudio (Cuadro rojo), en planta y profundidad. ....	44
<b>Figura 3.12</b> Eventos visualizados en epimap de la sismicidad antes de la estimulación ácida del pozo, abarcando el periodo de Junio- Noviembre 2009 en planta y profundidad. ....	46
<b>Figura 3.13</b> Eventos visualizados en epimap de la sismicidad durante de la estimulación ácida del pozo, en planta. ....	48
<b>Figura 3.14</b> Eventos visualizados en epimap de la sismicidad durante la estimulación ácida del pozo, en profundidad. ....	49

<b>Figura 3.15</b> Eventos visualizados en epimap de la sismicidad después de la estimulación ácida del pozo, en planta y profundidad. ....	51
<b>Figura 4.1</b> Ejemplo de ampliación de la forma de onda y el análisis espectral que se realizó en todos los eventos analizados. ....	55
<b>Figura 4.2</b> Muestra de los eventos no localizados seleccionados. ....	56
<b>Figura 4.3</b> Muestra todos los análisis espectral de la tabla 4.1 a primera vista, obtenidos del programa Seismo volcanalysis, donde el cuadro representa la banda de frecuencias de interés. ....	57
<b>Figura 4.4</b> Muestra todos los análisis espectral de la tabla 4.2 a primera vista, obtenidos del programa Seismo volcanalysis, donde el cuadro representa la banda de frecuencias de interés. ....	58
<b>Figura 4.5</b> Mapa que muestra los eventos tectónicos seleccionados de Abril a Agosto del año 2010, desde Google Earth, para su comparación con eventos inducidos. ....	59
<b>Figura 4.6</b> Análisis espectrales de los eventos tectónicos seleccionados. ....	61
<b>Figura 4.7</b> Análisis espectral tomando un evento significativo del grupo A, B y de los eventos tectónicos. ....	62
<b>Figura 4.8</b> Ejemplo del procedimiento en SEISAN para obtener registros en desplazamientos en el cual, primero se corrige la señal por la respuesta del instrumento. ....	63
<b>Figura 4.9</b> Ejemplo del resultado arrojado por SEISAN para el cálculo de los parámetros de fuente mediante la selección de paquete de ondas S. ....	67
<b>Figura 4.10</b> Correlación entre el momento sísmico ( $M_0$ ) y la caída de esfuerzo ( $ST$ ) de la acumulación A (Azules) y los eventos tectónicos (Rojos) seleccionados. ....	70
<b>Figura 4.11</b> Correlación entre frecuencia esquina ( $f_0$ ) y momento sísmico ( $M_0$ ) de los eventos inducidos (Azules) y los eventos tectónicos (Rojos) seleccionados. ....	71
<b>Figura 4.12</b> Correlación entre Momento sísmico ( $M_0$ ), radio de ruptura ( $R$ ) y caídas de esfuerzo constantes de los eventos inducidos (Azules) y los eventos tectónicos (Rojos) seleccionados. ....	72
<b>Figura 4.13</b> Correlación entre Magnitud ( $M_w$ ) y profundidad de los eventos inducidos (Azules) y los eventos tectónicos (Rojos) seleccionados. ....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1</b> Datos de los pozos del campo Geotérmico Tres Vírgenes. ....	21
<b>Tabla 2-2</b> Información de los procesos del pozo LV-6.....	24
<b>Tabla 3-1</b> Muestra los Procesos relacionados con los cambios significativos de sismicidad. ....	31
<b>Tabla 3-2</b> Modelo de velocidad utilizado en el presente estudio. $V_p$ , velocidad de la onda P. ....	36
<b>Tabla 3-3</b> Parámetros hipocentrales de los 41 sismos seleccionados de los 187 localizados. La fecha está dado por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora GMT en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof., la profundidad focal en kilómetros; error de la localización RMS, la raíz media cuadrática en segundos, magnitud de duración (Mc). ....	40
<b>Tabla 3-4</b> Muestran los tres periodos que se consideran con sus respectivos colores de localización. ....	41
<b>Tabla 4-1 y 4-2</b> Corresponden a la acumulación de eventos sísmicos de la Figura.3.13 .A) y B). En la cual se muestra fecha, hora, longitud, latitud, magnitud y frecuencias significativas de cada evento sísmico. ....	55
<b>Tabla 4-3</b> Corresponde a la acumulación de eventos sísmicos de la Figura.4.3 En la cual se muestra fecha, hora, longitud, latitud, magnitud y frecuencias significativas de cada evento sísmico. ....	60
<b>Tabla 4-4</b> Parámetros de fuente de los eventos inducidos asociados a la estimulación del pozo LV-6. Simbología: Prof., profundidad en Km; $M_0$ , momento sísmico en Nm; ST, caída de esfuerzo en bar; $f_0$ , frecuencia esquina en Hz; R el radio de fractura en Km; OM nivel espectral plano en nm-s (nanómetro-segundo) y $M_w$ , magnitud de momento sísmico. ....	68
<b>Tabla 4-5</b> Parámetros de fuente de los tectónicos seleccionados (Figura 4.4.1). Simbología: Prof., profundidad en Km; $M_0$ , momento sísmico en Nm; ST, caída de esfuerzo en bar; $f_0$ , frecuencia esquina en Hz; R el radio de fractura en Km; OM nivel espectral plano en nm-s y $M_w$ , magnitud de momento sísmico. ....	69







## RESUMEN

La presente tesis se realizó con ayuda de la información proporcionada por CFE (Comisión Federal de Electricidad) en el cual se analizaron 187 sismos locales de 2021 registrados en el año 2009, en el cual se realizó el proceso de acidificación y estimulación ácida del pozo LV-6, con la finalidad de analizar la actividad sísmica relacionada a dicho proceso.

De acuerdo con los resultados se presentó una sismicidad inducida significativa la cual se asoció a los procesos del pozo debido a su distribución en superficie y a profundidad, ya que se encuentra registrada en relación a los procesos de la estimulación ácida. Esta sismicidad se encuentra localizada con una dirección SW con respecto al pozo, con un azimut de  $231^\circ$  aproximadamente, y abarca un área aproximada de  $919.5\text{m}^2$ , está a su vez se encuentra sobre el sistema de fallas el Volcán a una profundidad de 1.5 a 2.5km.

Una vez analizada esta sismicidad se llevó a cabo una comparación con 18 sismos tectónicos del Campo Geotérmico Tres Vírgenes B.C. S ( $0.4 \leq M_w \leq 1,8$ ), registrados en el año 2010, sobre el sistema de fallas La virgen. Se analizó con el motivo de realizar una comparación en cuanto a su forma de onda, análisis espectral y parámetros de fuente (momento sísmico, magnitud de momento, caída de esfuerzo, frecuencia esquina y radio de ruptura) con los sismos inducidos analizados de la estimulación ácida del pozo LV-6 con el propósito de encontrar si existe alguna diferencia entre ambos.



## ABSTRACT

The present thesis was realized by help of the information provided by CFE (Federal Commission of Electricity) in which 187 local earthquakes of 2021 were analyzed registered in the year 2009, in which the process was realized of acidification and acid stimulation of the well LV-6, by the purpose of analyzing the seismic activity related to the above mentioned process.

In agreement with the results one presented an induced significant seismicity which associated to the processes of the well due to his distribution in surface and to depth, since it is registered in relation to the processes of the acid stimulation. This seismicity is located by a direction SW with regard to the well, by an azimuth of 231 ° approximately, and includes an approximate area of 919.5m<sup>2</sup>, this one in turn is on the system of faults the Volcano to a depth of 1.5 to 2.5km.

Once analyzed this seismicity carried out a comparison with 18 tectonic earthquakes of the Geothermal Field Three Virgins B.C. S (0.4 = Mw = 1.8), registered in the year 2010, on the system of faults The Virgin. It was analyzed by the motive of realizing a comparison as for his waveform, spectral analysis and parameters of source (seismic moment, magnitude the moment, stress drop, the corner frequency and source radius) with the induced earthquakes analyzed of the acid stimulation of the well LV-6 with the intention of finding if some difference exists between both.



## OBJETIVOS Y ALCANCES

Analizar la actividad sísmica antes, durante y después de la perforación y estimulación ácida del pozo LV-6 con el objetivo de:

1. Determinación de sus parámetros hipocentrales de la actividad sísmica ocurrida en el campo geotérmico Tres Vírgenes durante el periodo Junio 2009 hasta Julio de 2010.
2. Analizar la correlación existente entre la sismicidad y los procesos de perforación y estimulación ácida.
3. Conocimiento de la influencia en la sismicidad inducida con respecto del Campo geotérmico
4. Correlacionar los eventos inducidos con respecto de eventos Vulcano- Tectónicos registrados en el Campo Geotérmico
5. Analizar los eventos sísmicos de acuerdo con su forma de onda y forma espectral para identificar su origen.
6. Continuar con el conocimiento en cuanto al fracturamiento del campo Geotérmico Tres Vírgenes



## DESARROLLO DEL TRABAJO

El presente estudio está organizado de acuerdo a los siguientes capítulos:

*Capítulo 1.* Fundamentos teóricos necesarios para comprender la sismicidad inducida, los conceptos básicos del fracturamiento Hidráulico, microsismicidad, así como antecedentes de estudios previos con relación al campo Geotérmico Tres Vírgenes y a la acidificación de pozos.

*Capítulo 2.* Marco geológico y tectónico sobre el cual se ubica el campo geotérmico, posteriormente se habla de la evolución geológica de las estructuras volcánicas, la geología estructural, la columna estratigráfica actualizada que ha sido propuesta con base en los estudios previos más recientes y una descripción del pozo LV-6 el cual es el fundamental para este trabajo.

*Capítulo 3.* Selección de eventos, 1 estadística de todos los eventos registrados en nuestro periodo de interés, la cual se relacionó con los procesos de perforación y estimulación ácida del pozo LV-6. Se describe las características del software utilizado para el procesamiento de datos sísmicos y los parámetros que contienen la información geológica y geofísica para el uso adecuado del software. También se describe el procedimiento que se siguió para la relocalización hipocentral de los sismos seleccionados y el cálculo de su magnitud.

*Capítulo 4.* Distribución en superficie y en profundidad de los sismos localizados en los tres periodos. Caracterización de forma de onda, análisis espectral y obtención de sus parámetros de fuente para la identificación de eventos no localizados y su correlación con eventos Tectónicos.

*Capítulo 5.* Discusiones y conclusiones en cuanto a la información obtenida de nuestro análisis.

## Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

La geotermia es una fuente renovable que se utiliza en el mundo para generar energía eléctrica desde 1911, y en México desde 1959 cuando empezó a operar la primera unidad geotermoeléctrica en el país, con 3.5 MW de capacidad, en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, actualmente fuera de operación.

Hay varios campos geotérmicos identificados en México, cuatro de las cuales se encuentran actualmente bajo explotación con una capacidad total instalada de 1017.4 MW netos, lo que representa casi el 2% de la capacidad eléctrica total del país operada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para el denominado servicio público de energía eléctrica. La presente tesis se enfocó al campo geotérmico Tres Vírgenes (Figura 1.1), Tales campos son los siguientes:

- ✓ **Cerro Prieto, B.C., con 720 MW**
- ✓ **Los Azufres, Mich., con 194 MW**
- ✓ **Los Humeros, Pue., con 93.4 MW**
- ✓ **Las Tres Vírgenes, B.C.S., con 10 MW**

CFE tiene identificado un proyecto ya aprobado denominado:

- ✓ **Cerritos Colorados, Jal., (sin plantas en operación pero con varios pozos perforados y un potencial evaluado por la CFE en 75 MW).**



Figura 1.1 Mapa de la República Mexicana que muestra los campos geotérmicos de México.

# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

Como parte del estudio de los campos geotérmicos se monitorea la actividad sísmica mediante sensores ubicados a su alrededor, para analizar los eventos y obtener información acerca del subsuelo y el comportamiento de los fluidos en el yacimiento y de los pozos.

En el presente estudio se analiza la distribución en superficie y en profundidad de los sismos ocurridos en el campo geotérmico Tres Vírgenes (México) durante el periodo de Perforación y Estimulación ácida del pozo LV-6. Los datos utilizados corresponden a 41 sismos registrados por la red sísmica instaladas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Asimismo, se realiza una estadística del número de sismos registrados por menos de 3 estaciones de la red, los cuales también serán analizados, de forma que se identifique si presentan alguna dependencia con el proceso de dicho pozo, un análisis de su forma de onda y análisis espectral, además de efectuar una comparación con eventos tectónicos fuera de la zona geotérmica. Los resultados muestran que el total de sismos (41) presentan magnitudes  $M_d \leq 2.2$  y profundidades que no sobrepasan los 4.3 km. Su distribución en superficie y en profundidad muestra principalmente dos intensas actividades sísmicas en la zona de perforación y estimulación ácida, alrededor del pozo de interés. (LV-6) y un aumento significativo de la sismicidad al inicio de producción del pozo. La relación entre las formas de onda y análisis espectral de los eventos localizados con los no localizados sugieren una estrecha relación en cuanto a su origen. Con base en los resultados obtenidos del análisis sísmico: la distribución de la sismicidad en superficie, en profundidad, el análisis formas de onda y análisis espectral, sugieren que un alto porcentaje de la actividad sísmica que ocurre en el campo geotérmico Tres Vírgenes es de tipo inducido, asociado al proceso de enfriamiento del pozo.

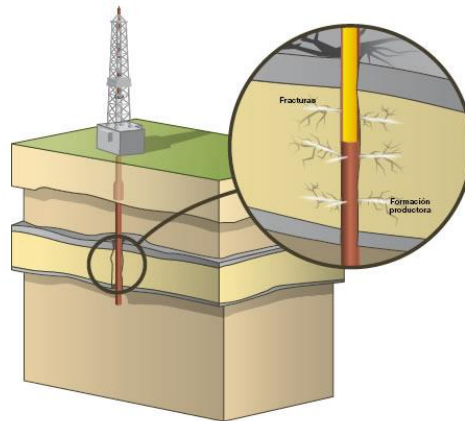
## 1.1 Sismicidad Inducida

El monitoreo microsísmico consiste en registrar sismos pequeños de magnitud menores a 3 ( $M_w \leq 3$ ) o emisiones acústicas. El término micro-sismo en ocasiones se utiliza como sinónimo de eventos microsísmicos, pero también se define como ruido de fondo sísmico generado por las olas del océano en la banda de baja Frecuencia (Hz). Sin embargo hay una gran diferencia con el ruido de fondo o los microsismos o sismos pequeños, ya que estos presentan un arribo claro de las ondas compresionales y transversales que se asocian con origen natural o inducidos artificialmente con movimientos de fractura, lo que resulta en la deformación inelástica de fractura geomecánica y asociadas con ondas de campo elásticas que se propagan hacia el exterior desde la fuente. La deformación Microsísmica es una componente de los esfuerzos geomecánicos asociados con el fracturamiento hidráulico (figura 1.2), de tal manera que los microsismos son la respuesta de la fractura estimulada, lo que permite una interpretación única de crecimiento de la fractura. Típicamente, las grabaciones pasivas se utilizan para detectar eventos microsísmicos y para estimar la ubicación y los atributos de la fuente, utilizando métodos de procesamiento sísmico similares a los utilizados para los terremotos de origen tectónico.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

Normalmente, los microsismos se distinguen de grandes terremotos basados en intensidad de la fuente medida en la escala de magnitud de un terremoto. El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) clasifica microsismos que tienen una magnitud menor que 3, un nivel que es justo en el momento de la percepción, pero poco probable que resulte en daños. Los microsismos tienden a seguir la misma relación frecuencia-magnitud como los sismos tectónicos, donde por cada reducción de una unidad de magnitud hay aproximadamente un incremento de diez hasta cien veces más en el número de eventos. Por lo tanto, a pesar de los grandes sismos son raros, los microsismos son más numerosos y omnipresentes.



**Figura 1.2** Ejemplo del fracturamiento hidráulico.

La microsismicidad puede ser generada por una variedad de actividades humanas, incluidas determinadas actividades industriales que alteran tanto el estado de estrés o la presión de poro en las rocas (McGarr et al., 2010, tomado de *Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs*. Sponsored by the Society of Exploration Geophysicists. ). Estos cambios geomecánicos pueden dar lugar a la creación de nuevas fracturas o deformaciones de las fracturas preexistentes. Dependiendo de los detalles específicos sobre la deformación de fractura, los cambios podrían conducir a la generación microsismicidad. En casos raros, los microsismos inducidos pueden ser lo suficientemente grandes como para ser potencialmente dañinos. Independientemente de magnitud, sin embargo, la sismicidad inducida da una idea de los procesos geomecánicos que desencadenan la fracturación.

### 1.1.1 Sismicidad Inducida Por El Fluido

Los líquidos también pueden inducir sismicidad, tales como la actividad asociada con grandes depósitos de agua superficial, embalses de las represas o con la inyección de fluidos del subsuelo. Después de la construcción de una presa, las excesivas masas superficiales y la presión de poros generados durante el depósito de llenado pueden causar sismicidad inducida (Simpson, 1976,



tomado de *Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs*. Sponsored by the Society of Exploration Geophysicists.). Por ejemplo, un terremoto con una magnitud de 6.3 fue inducida durante el llenado de un depósito en la India en 1967, otro ejemplo de sismicidad inducida por inyección de líquido se produjo en 1960 en Denver que generó sismos hasta de 4.8 de magnitud (Healey et al., 1968), causada por la inyección de fluido de desecho en el Arsenal de las Montañas Rocosas. El interés científico en los terremotos de Denver llevó a Rangely el experimento en el control de sismos, que mostró con éxito que la sismicidad inicia y se detiene con la inyección (Raleigh et al., 1976, tomado de *Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs*. Sponsored by the Society of Exploration Geophysicists.).

### 1.1.2 Monitoreo Microsísmico De Inyección De Fluido En Campos Geotérmicos

Las técnicas modernas de monitoreo microsísmico de extracción e inyección de fluido incluyendo la estimulación por fractura hidráulica, se iniciaron en la década de 1970 como una técnica para controlar los sistemas geotérmicos mejorados (EGS). Los fluidos inyectados se utilizan para crear una red de fracturas que permite la circulación de fluidos y el aprovechamiento de la energía geotérmica del subsuelo (Evans et al., 1999, tomado de *Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs*. Sponsored by the Society of Exploration Geophysicists).

El monitoreo microsísmico normalmente implica desplegar sismómetros para detectar y registrar las señales sísmicas. Las señales son procesadas para determinar la ubicación y otros atributos relacionados con la señal de origen. Una colección de eventos microsísmicos se denominarán en adelante, como una “imagen Microsísmica”. Cada uno se produce en un tiempo conocido, entonces se puede usar para interpretar el alcance y el crecimiento de la red de fracturas asociado con la estimulación EGS. La imagen Microsísmica proporciona objetivos de perforación para hacer buenas conexiones entre pozos a través del sistema de fracturas estimulada.

Por lo tanto, el monitoreo microsísmico es una poderosa herramienta para la determinación de imágenes de fracturamiento. Actualmente, es la única tecnología que puede dar una idea de la geometría de las fracturas estimuladas. El monitoreo microsísmico de EGS se ha realizado utilizando redes sísmicas en superficie y en algunos casos con sensores de pozo sensibles. Los sensores de pozo tienen poco ruido y están cercanos a la región de origen microsísmico y permiten una mejor sensibilidad para grabar eventos microsísmicos de pequeña magnitud.

El monitoreo microsísmico se ha utilizado para observar el fracturamiento o fallamiento asociado con la compactación del depósito, la producción, y las inyecciones de recuperación secundaria de vapor, agua o gas. La microsismicidad también puede ser usada para monitorear las inyecciones para la eliminación de residuos, una aplicación que va más allá de la industria del petróleo y el gas.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

A finales de 1960 y principios de 1970, los investigadores comenzaron a analizar las ventajas del monitoreo microsísmico de las fracturas hidráulicas. Los primeros experimentos se centraron en la grabación con un solo sensor para probar la existencia de microsismos y determinar las características de la señal. Finalmente, el seguimiento con una red de sensores se realizó para localizar con precisión las fuentes microsísmicas, lo que llevó al primer ejemplo publicado (Power et al., 1976, tomado de *Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs*. Sponsored by the Society of Exploration Geophysicists) de la imagen microsísmica de una fractura hidráulica en el campo Pinedale en 1974.

El monitoreo microsísmico para aplicaciones EGS comenzó con proyectos de roca caliente seca en la década de 1970. El primer ejemplo publicado de monitoreo microsísmico con sismómetros es a partir de un proyecto de fracturas hidráulicas relacionadas con la energía geotérmica de Nuevo México. (Albright y Hanold, 1976). Métodos de adquisición y procesamiento han evolucionado, permitiendo una imagen más precisa de la actividad sísmica asociada con la inyección. Esta tendencia ha continuado hasta el presente, el monitoreo microsísmico continua para caracterizar la estimulación en muchos sistemas EGS (Evans et al, 1999, tomado de *Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs*. Sponsored by the Society of Exploration Geophysicists. ).

### 1.1.3 Antecedentes De Sismicidad Inducida En El Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla, México

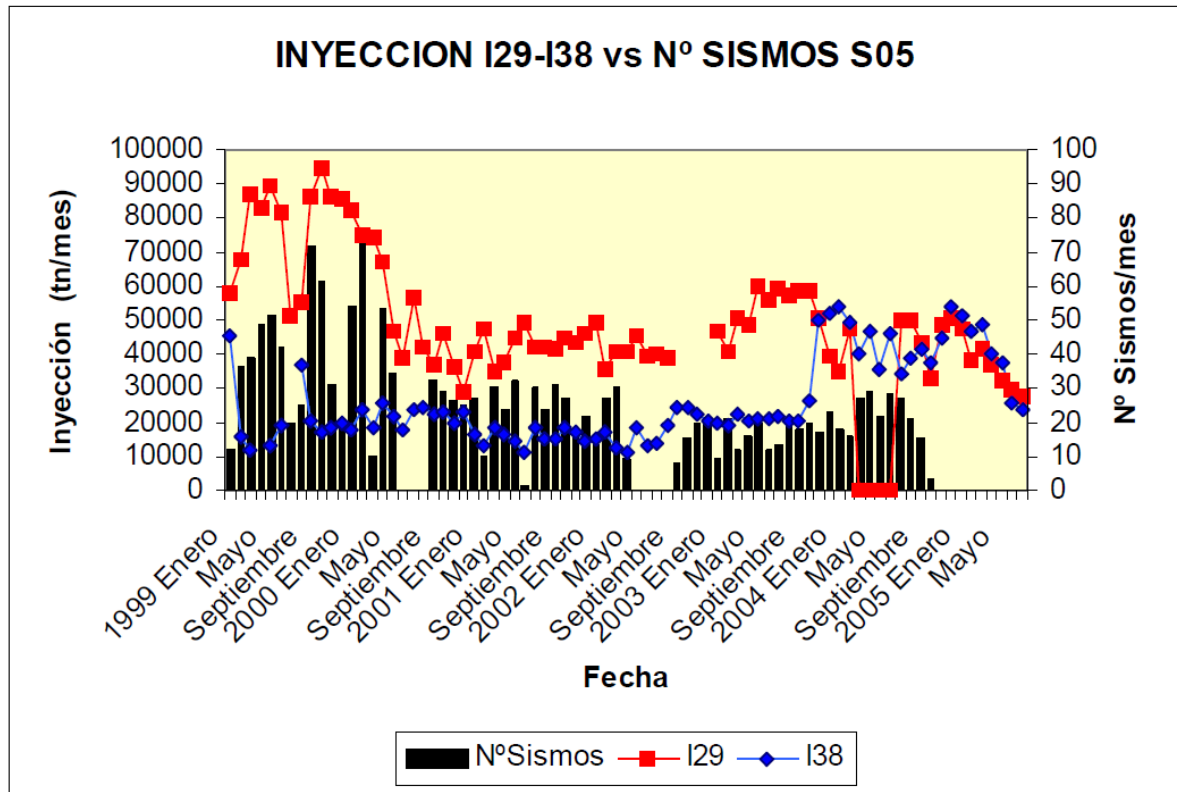
El campo geotérmico Los Humeros se encuentra localizado en el extremo SE del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) entre los límites de los estados de Puebla y Veracruz; aproximadamente a 32 km al NO de Perote (Veracruz). Las coordenadas geográficas: 19.655 a 19.733 de latitud Norte y -97.397 a -97.474 de Longitud Oeste.

La información sísmica utilizada en el estudio proviene de redes sísmicas instaladas alrededor del campo geotérmico Los Humeros: una Red Sísmica Telemétrica Permanente (RSTP) y una Red Sísmica Temporal (RST).

En este estudio se efectuó una correlación del total de sismos por mes (Nº sismos/mes) registrados en la estación S05 (sismos localizados y no localizados) durante el periodo diciembre 1997 a diciembre 2004, con la inyección en toneladas por mes (Tn/mes) es mostrada en las Figura 1.3. La ocurrencia de sismos en la estación S05 ubicada en la Zona norte del campo geotérmico de Los Humeros y la cantidad de agua inyectada en I29 muestra un comportamiento similar; es decir, la sismicidad aumenta cuando la cantidad de inyección de agua al subsuelo aumenta; asimismo, si ésta disminuye la sismicidad también disminuye. Sin embargo, si se analiza la sismicidad y la inyección I38

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

no hay una relación directa para el periodo 1999 a septiembre del 2004 debido a que la cantidad inyectada por éste es menor a I29. Obsérvese que en enero del 2004 se aumentó la cantidad de inyección en I38 a los mismos niveles que I29 y la tendencia de la sismicidad aumenta durante los siguientes meses aunque I29 deja de operar por un periodo de 3 meses (junio a septiembre del 2004).



**Figura 1.3** Correlación de la cantidad de inyección de agua en los pozos I29 e I38 Vs los números de sismos registrados en la estación S05.

Por otro lado a fin de observar este aumento de la producción y su posible relación con la sismicidad se ha graficado el número de sismos registrados en la estación S06 ubicada en la Zona sur del campo geotérmico y la cantidad de producción de vapor, observada principalmente en los 8 pozos, los mismos que son mostrados en la Figura 1.4. La razón por la cual se realiza la evaluación en la estación S06 se debe precisamente a que en esta zona ocurrió el sismo de magnitud moderada ( $M_w=3.6$ ) el 21 de enero del 2002. En esta figura se puede observar un ligero aumento de la sismicidad en la estación S06 a partir de noviembre del 2003 y se prolonga hasta septiembre del 2004; mientras que la producción aumenta relativamente en marzo del 2003. Sin embargo un aumento significativo de la producción se observa principalmente en marzo del 2004, coincidiendo curiosamente con el aumento significativo de sismos durante la fecha mencionada.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

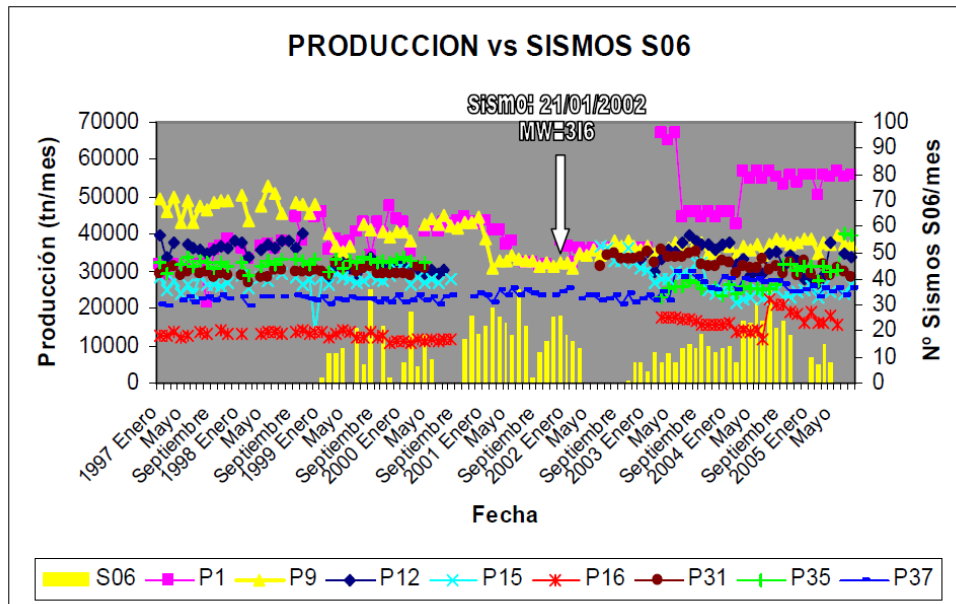


Figura 1.4 Muestra la sismicidad registrada en la estación S06 y la cantidad de producción de vapor, observada principalmente en los 8 pozos.

### 1.1.4. Antecedentes De Sismicidad Inducida En El Campo Geotérmico Tres Vírgenes. B.C.S.

El estudio de la sismicidad en la región geotérmica de Tres Vírgenes y sus alrededores inició desde 1992 y ha continuado de manera intermitente. Tanto los primeros trabajos (Macías, 1997), (Rodríguez, 2000) consideran a esta región como una zona de alta sismicidad. El trabajo de Rodríguez (2000) logra registrar con la red permanente del campo geotérmico un total de 790 sismos en más de dos estaciones durante el periodo de enero-junio de 1999. De este total, Rodríguez asigna hipocentros a 70 sismos locales sobre el complejo volcánico de las Tres Vírgenes. De éstos selecciona 14 eventos mejor localizados y los asocia a las trazas de las fallas geológicas La Virgen y El Azufre.

En septiembre del 2003 el Instituto de Ingeniería de la UNAM y la CFE realizaron la instalación de 10 estaciones sísmicas (temporales y permanentes) alrededor de esta región, para el monitoreo del campo geotérmico, el análisis de la actividad sísmica en superficie y en profundidad sirvió para modelar la posible configuración sismotectónica del campo geotérmico. También se reportó un aumento en la sismicidad relacionada con los pozos productores e inyectores (Lermo et al., 2004). En el año 2006 se vuelve a realizar un estudio de monitoreo en el campo geotérmico. La evaluación de la sismicidad permitió delinear la zona de Fallamiento de los sistemas de fallas activos como el de La Virgen y El Partido (Lermo et al. 2006). Posteriormente a partir del año 2008 se han elaborado

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

informes anuales sin interrupción hasta la fecha sobre el estudio de la sismicidad en el campo geotérmico para la CFE. Estos estudios han servido para mejorar la distribución de la red de estaciones y analizar la relación de la sismicidad con el funcionamiento de los pozos productores e inyectores (Lermo et al, 2004-2011). En el año 2010 la CFE realizó un informe que recopila y actualiza la información geológica, geoquímica y geofísica del Campo Geotérmico para futuros trabajos que se lleven a cabo en la zona. Más recientemente realizaron un análisis más detallado sobre la Estratigrafía y Geología del complejo volcánico Tres Vírgenes (Macías y Jiménez, 2013) y por ultimo Lorenzo y Soto (2013) presentaron un estudio de Sismicidad en el complejo volcánico con el fin de mostrar la actividad sísmica asociada la actividad hidrotermal

El monitoreo de la actividad microsísmica pasiva en el Campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes, B. C. S., tiene como propósito identificar fallas geológicas activas, zonas fracturadas o permeables, y la relación que presente con la inyección de agua geotérmica y/o extracción de fluido geotérmico en el subsuelo, que puedan estar relacionadas con el yacimiento geotérmico. Estas zonas pueden manifestarse propiamente debido a la ocurrencia de eventos sísmicos muy pequeños, denominados microsismos, los cuales se originan debido al movimiento de los fluidos geotérmicos o la reactivación de sistemas de fallas preexistentes. Se considera al monitoreo de la actividad sísmica pasiva como un método de exploración relevante. Por lo que para la recopilación de este tipo de datos, se ha apoyado en la capacidad y experiencia de expertos sismólogos mexicanos, los cuales han sido los responsables del mantenimiento y operación de los equipos correspondientes, así como de la recolección y procesamiento de datos sísmicos, así como del análisis de los mismos.

Con el objetivo de aprovechar esta información como sustento de nuevas propuestas de pozos, en el Campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes, se han instalado redes sísmicas en diferentes periodos de tiempo (Rodríguez, 2000; Lermo et al. 2004; Lermo et al. 2006; Lermo et al. 2008; Lermo et al. 2009; Lermo et al. 2010, y Lermo et al. 2011), lo que ha permitido, mediante el análisis de los datos sísmicos registrados, poder relacionar la microsismicidad con un sistema hidrotermal de alta temperatura, teniendo como referencia la geología del subsuelo proporcionada por los pozos. Esta actividad microsísmica sugiere, por los patrones espaciales que presenta en general, que pudiera estar relacionada con sistemas de fallas activas y/o con el movimiento de fluidos dentro del yacimiento geotérmico.

El campo Las Tres Vírgenes es uno de los campos que se han empezado a explotar recientemente. Se localiza en el extremo este de la península de Baja California Sur. (Figura 1.5). Se han perforado hasta ahora 13 pozos, con una capacidad de generación de energía eléctrica de 10Mw.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---



**Figura 1.5** Ubicación de la Zona de estudio: El complejo Volcánico Tres vírgenes desde Google.

Para conocer en general si la región donde hay manifestaciones geotermales son rentables económicamente o no, se realizan diferentes estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, para así conocer las propiedades físicas del campo antes de la explotación y durante la explotación. El método geofísico más utilizado es la sismología. Con ésta se pueden conocer zonas de actividad tectónica activa y en la etapa de explotación se pueden conocer los diferentes esfuerzos a los que está sometido el campo geotérmico como producto de la inyección de agua y explotación de vapor de agua en sí.

Los estudios de carácter sísmico que se realizan antes de la explotación de un campo geotérmico son mínimos en México, y estos en general se hacen durante la explotación. Estudios realizados por Rodríguez (1999) en el campo geotérmico Tres Virgenes, muestra una intensa actividad sísmica, asociada a una falla regional conocida como La Virgen. En este campo geotérmico, por medio de estudios de sismicidad, se notó un aumento de sismicidad local en la etapa de explotación, en la

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

etapa de estimulación ácida realizada a dos pozos productores, LV-4 y LV-13 (Lermo et al., 2004). Estos sismos muestran la presencia de fracturamiento o microfracturamiento (aproximadamente a una profundidad de entre 2 y 4 km) debido a los cambios físicos y químicos que sufre el yacimiento como: cambios de presión, temperatura, cambios de composición química entre fluidos de superficie y profundos. Esta inyección o presión que se genera en el pozo, en este caso dada por la estimulación ácida, es llamada "Sismicidad Inducida".

El proceso de estimulación ácida, o acidificación, de un pozo geotérmico, se da cuando un pozo no produce de acuerdo con el potencial y características de la formación original, dado a que la vecindad del pozo pueda estar dañada. Para estimular un pozo existen sistemas y técnicas diferentes, según las características del pozo. El tipo de tratamiento de Estimulación Matricial consiste en inyectar fluidos por debajo del gradiente de fractura a la estructura porosa de la roca del yacimiento, para restablecer la permeabilidad en la matriz crítica. La matriz crítica es la zona comprendida de 3 a 5 metros, de manera radial, desde el centro del agujero perforado; se le conoce así ya que en esa parte ocurre la mayor parte de la caída de presión durante la producción. El daño a la permeabilidad de esta zona significa una reducción en la producción. En el tratamiento de estimulación matricial se usan fluidos como ácidos, distintos solventes y otros. Estos fluidos son inyectados, y restablecen la permeabilidad natural del pozo, removiendo el daño a la vecindad del pozo y a la matriz crítica.

## Capítulo 2 GENERACIÓN DE CAMPOS GEOTÉRMICOS

### 2.1 Localización

En 1983 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) inició la exploración del prospecto geotérmico Las Tres Vírgenes, donde se tiene volcanismo reciente y manifestaciones hidrotermales en la superficie (Lira et al., 1983; Ballina y Herrera, 1984; Quijano, 1984). La región de estudio del presente trabajo se encuentra en la porción noreste de Baja California Sur dentro del complejo volcánico de Tres Vírgenes que se ubica entre las coordenadas 27.40° a 27.59° latitud norte y -112.40° a -112.67° longitud oeste (figura 2.1). El desarrollo de éste complejo favoreció las condiciones termodinámicas adecuadas en el subsuelo para la existencia de un campo geotérmico el cual representa un potencial económicamente rentable que satisface la demanda energética de la región y así dar origen a los proyectos que trajeron la actual planta geotermoeléctrica de Tres Vírgenes BCS.

Es un campo volcánico del Cuaternario localizado a 34 km al norte de Santa Rosalía. Este complejo es el más joven de tres centros volcánicos al campo:

- ✓ La Caldera de la Reforma de 1.2 Ma (Sawlan, 1986; Schmidt, 1975)
- ✓ La Caldera del Aguajito de 0.8 Ma (Garduño-Monroy et al., 1993).
- ✓ El CVTV (Complejo volcánico Tres Vírgenes) está compuesto por tres aparatos volcánicos alineados en dirección NE-SO (Figura 2.1).

El Viejo es el aparato más antiguo localizado en el extremo NE, seguido del Azufre y finalmente el más joven La Virgen al SO, indicando una migración de la actividad volcánica hacia la Costa del Pacífico.

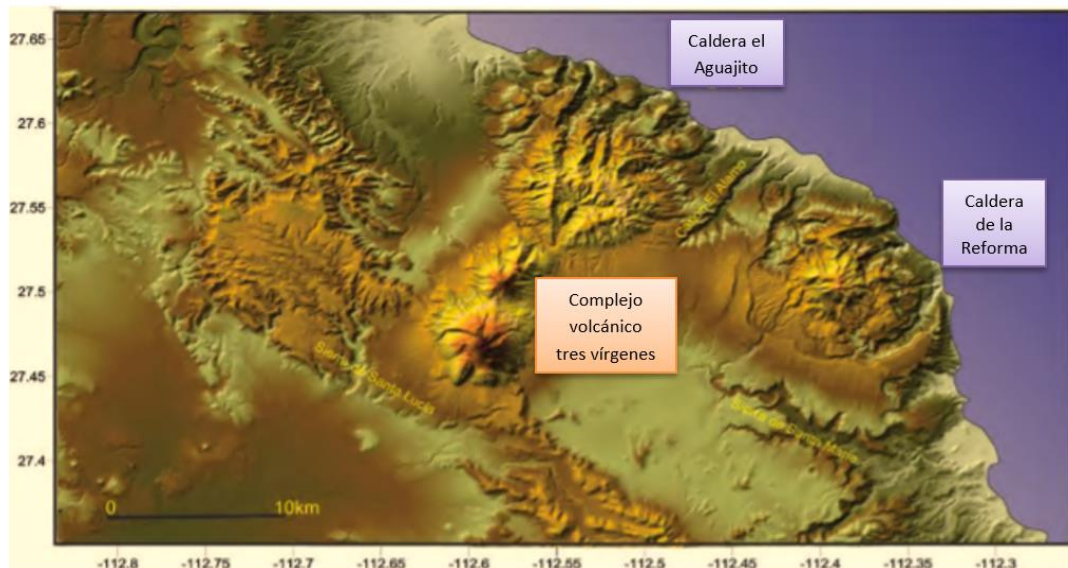


Figura 2.1 Mapa que muestra los tres centro volcánicos más importantes de la Región (Macías, 2012)



## 2.2 Ambiente Tectónico Y Geología Regional

El complejo Volcánico 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 inicia a los 12 Ma, 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 (Atwater, 1989; Stock y Lee, 1994; Sawlan y Smith, 1984, tomado de Macías, 2013).

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 (Demant 1984; Sawlan y Smith, 1984; Garduño et al., 1993; tomado de Macías, 2013) .

- ✓ La Caldera de Reforma: Se trata de una caldera de tipo resurgente, que se desarrolla después de los 2 Ma con un colapso caldérico bien definido, el cual tiene un diámetro de 11 km y abierto hacia el NE. Su parte central ocupada por rocas graníticas de una resurgencia de 1200 m (Demant 1984, tomado de Macías, 2013).
- ✓ Caldera del Aguajito: Se trata de una caldera que no tiene un colapso definido, pero que contiene una serie de domos riolíticos emplazados en una fractura circular, esta estructura dio lugar a flujos piroclásticos muy diferentes a los de la Caldera de Reforma, sus edades van de 0.5 a 0.7 Ma. La caldera tiene un diámetro de aproximadamente 6 km, y es cortada por una falla NNE-SSW que rompe la geometría de la caldera y que es parte de la fractura eruptiva que se asocia al vulcanismo de Tres Vírgenes (Sawlan 1984; Garduño-Monroy et al., 1993, tomado de Macías, 2013).
- ✓ Complejo Volcánico de Tres Vírgenes.
  - ✓ Domos del Viejo y el Azufre: Se trata de dos domos, donde hasta ahora se ha desarrollado el campo geotérmico, con mucha alteración y que forman parte del vulcanismo ligado a una estructura NE-SW. Ambos tienen estructuras de colapso hacia el NNE y paralelo a la fractura. La edad del Viejo es de al menos 180 mil años.
  - ✓ Volcán La Virgen: Es un edificio volcánico con una altura máxima de 1800 msnm formado a partir de una fractura eruptiva de orientación casi NE-SW, con edades de al menos 36,000 años al Reciente (Sawlan 1981, 1986, 1991, Capra et al., 1998, Schmitt et al., 2006). Dentro del edificio La Virgen se aprecia un antiguo centro localizado al SE, donde se encuentra instalada la actividad reciente, el edificio antiguo perdió su geometría en el sector NW, donde se aprecia actividad efusiva importante que enmascara el colapso del edificio. La parte NE del edificio ha sido formada por la efusión de grandes derrames de lava y pequeños crecimientos de domos.

# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

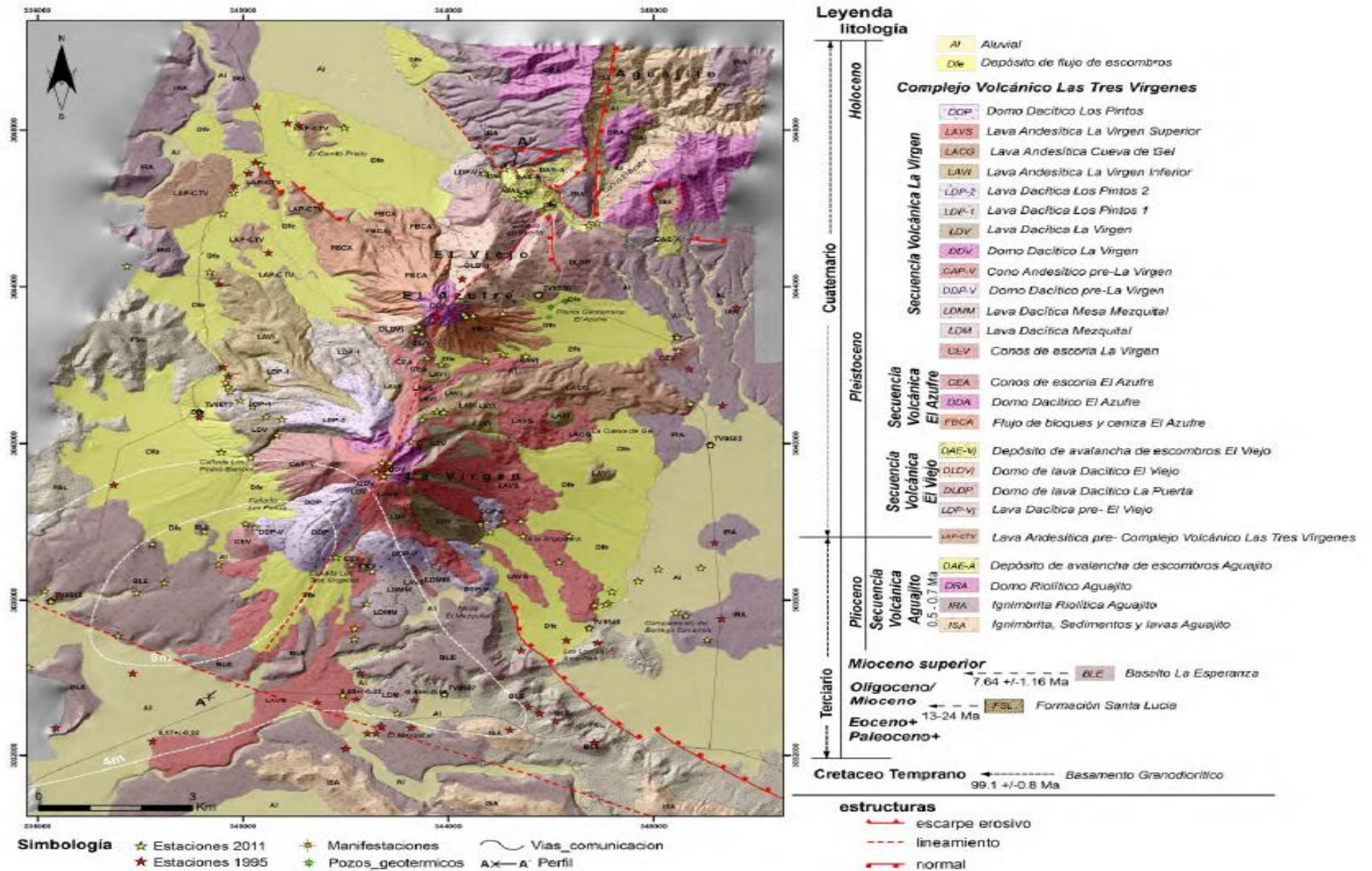


Figura 2.2 Mapa Geológico Regional del Campo Geotérmico Tres Virgenes (Macías; 2012)

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

El Viejo se formó mediante la extrusión de varios domos y lavas dacíticos y sufrió el colapso de su flanco norte produciendo una avalancha de escombros hacia el arroyo El Azufre. El Azufre se formó de la misma manera con la destrucción de su domo central y el emplazamiento de flujos piroclásticos de bloques y cenizas a su alrededor y la emisión final de su domo central. La actividad migró sobre la fisura eruptiva con la formación de conos de escoria hasta emplazarse el volcán La Virgen. Este volcán se ha construido a través de la efusión de domos y lavas basáltico andesíticas y dacíticas y muy pocas erupciones de tipo explosivo con la formación de una erupción Pliniana (Pómez La Virgen ~36 ka) y una de tipo Vulcaniano (Mezquital). Las erupciones más jóvenes han sido originadas a través de varias fisuras en la cima del volcán que han fluido hacia sus flancos. Las rocas del CVTV y conos periféricos varían de basaltos, andesitas basálticas, andesitas hasta dacitas (Figura 2.2).

Estos magmas generados a profundidad se han estacionado a ~7-9 km por debajo del CVTV antes de entrar en erupción. Esta profundidad concuerda con la actividad sísmica asociada al movimiento de fluidos en el yacimiento geotérmico que ocurre entre 2 y 7 km.

### 2.3 Manejo Y Operación Del Campo Geotérmico De Las Tres Vírgenes B.C.S.

En los campos geotérmicos que operan actualmente en el mundo, la energía geotérmica se extrae mediante pozos que producen fluidos calientes de dos tipos principales de yacimientos subterráneos. Uno de estos tipos está representado por los yacimientos hidrotermales que presentan una permeabilidad natural elevada. El otro lo constituyen los yacimientos tipo EGS (Enhanced Geothermal System) con patrones de flujo construidos artificialmente. Los campos geotérmicos de este último tipo aún se encuentran en etapas de demostración y prueba, principalmente en Europa. En nuestro caso nos referimos a un yacimiento hidrotermal.

Como los recursos geotérmicos se encuentran en el subsuelo, es necesario utilizar métodos exploratorios indirectos (geológicos, geoquímicos y geofísicos) para localizarlos y evaluarlos. Los objetivos de la exploración son identificar y evaluar prospectos de yacimientos geotérmicos antes de la perforación y coadyuvar a caracterizar los yacimientos (incluyendo las propiedades de los fluidos) para permitir la estimación de su comportamiento y vida útil. La exploración de un prospecto geotérmico implica estimar su ubicación, su extensión lateral y profundidad con métodos geofísicos, y perforar después pozos exploratorios para probar sus propiedades. Cuando en un área geográfica concreta se cumplen las condiciones geológicas y económicas necesarias para que se puedan explotar los recursos geotérmicos del subsuelo, se dice que en ese punto existe un yacimiento geotérmico.

En este caso se hablará de cómo está constituido la explotación de los recursos geotérmicos, haciendo énfasis a como se encuentra compuesta la planta geotérmica Tres Vírgenes, el cual se

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

ubica a la mitad de la Península de Baja California, al norte del estado de Baja California Sur y dentro de la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biósfera de El Vizcaíno. El campo está dentro de un complejo volcánico cuaternario compuesto por tres volcanes alineados en dirección SW de los cuales proviene el nombre del campo.

Los fluidos están en rocas intrusivas (principalmente granodioritas) y la fuente de calor del sistema está asociada a la cámara magmática del volcán La Virgen, el más reciente y meridional del complejo. Únicamente hay tres pozos productores que producen 0.6 millones de toneladas de vapor y 1.8 millones de toneladas de salmuera al año, la cual se inyecta por completo al yacimiento mediante un pozo.

Para la explotación del recurso se requiere de los siguientes elementos (Figura 2.3):

- a) Un reservorio líquido dominante.
- b) Pozos productores
- c) Tuberías de conducción
- d) Silenciadores
- e) Unidades de separación
- f) Planta de generación (turbinas)
- g) Lagunas de sedimentación
- h) Pozos de inyección.

Instalaciones Superficiales

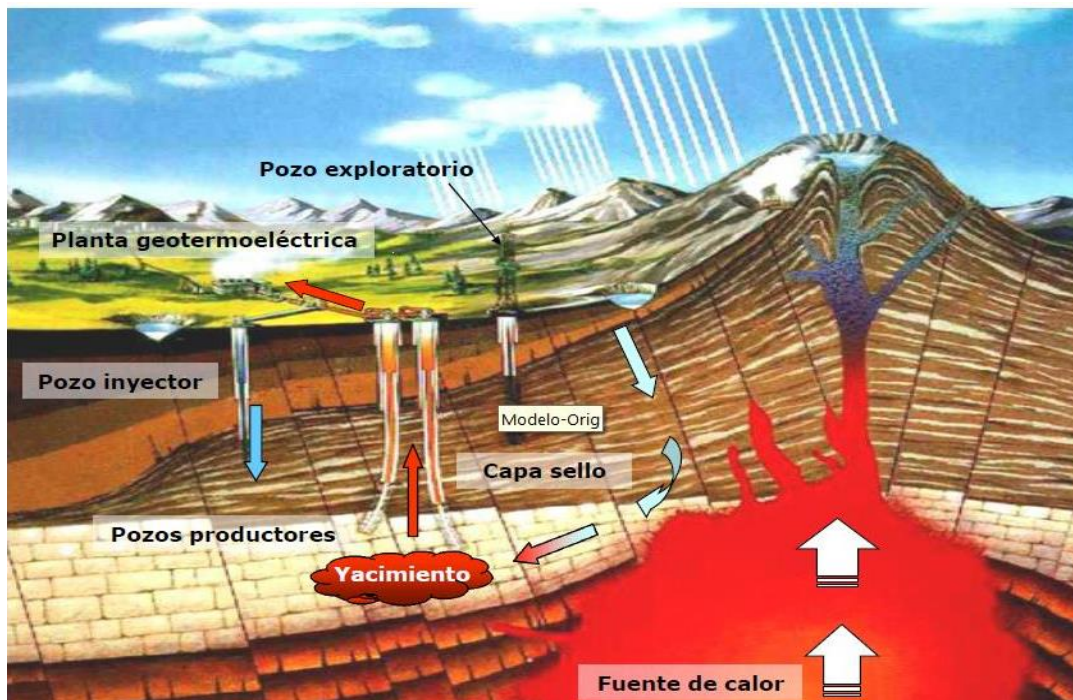


Figura 2.3 Modelo de un campo geotérmico.

### 2.3.1 Reservoirio Líquido Dominante

Los Campos Geotérmicos están generalmente constituidos por tres principales características fundamentales de origen geológico, las cuales se hacen mención:

- ✓ **Fuente de calor:** La cual está conformada por la energía térmica provocada a altas temperaturas en el interior de la corteza terrestre (cámara magmática).
- ✓ **Estrato de roca permeable:** El líquido geotérmico al circular por la roca permeable provoca una transferencia de calor de la roca al fluido, con lo que se produce líquidos geotérmicos calientes y vapor. Estos líquidos se desplazan a través de fracturas, las cuales serán interceptadas por el pozo en la superficie.
- ✓ **Capa sello o capa confinante:** Estrato geológico que impide que los fluidos calientes suban hasta la superficie y disipen su energía a la atmósfera.

### 2.3.2 Pozos

Los pozos geotérmicos se perforan a profundidades variables hasta un máximo actual de unos 5 km, empleando métodos similares a los utilizados en pozos petroleros pero adaptados a las altas temperaturas y presiones usuales en ambientes geotérmicos. Los pozos pueden ser verticales o desviados. Estos últimos se perforan con una inclinación de entre 30 y 50° con respecto de la vertical a partir de un punto de desviación ubicado a una profundidad que normalmente varía entre 200 y 2000 m. Se pueden perforar varios de estos pozos a partir de una misma plataforma, dirigiéndolos en diferentes direcciones para llegar a un mayor volumen del recurso y para cortar estructuras permeables, reduciendo al mismo tiempo los impactos superficiales.

#### ✓ Pozos productores

Los pozos productores descargan agua caliente y/o vapor. El agua caliente es realmente una salmuera con contenidos variables de sólidos totales disueltos. En yacimientos hidrotermales de alta temperatura, a medida que baja la presión una fracción del agua líquida hierve ("flashea") y se convierte en vapor. El vapor separado es enviado a una turbina para generar electricidad y el agua caliente remanente puede hacerse "flashear" de nuevo a menor presión y temperatura para obtener aún más vapor.

Para su operación es necesaria la instalación de válvulas en su parte superior, conocida como cabezal. Debido a las características químicas que presentan los fluidos en algunos campos, es necesario utilizar métodos para controlar la depositación de carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en profundidad.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

El método de control consiste en la inyección constante de un producto inhibidor dentro del pozo, el cual impide la formación de depósitos de  $\text{CaCO}_3$ .

### ✓ Pozos inyectoros

Son utilizados en los campos geotérmicos ya que conducen el agua residual del campo geotérmico para ser de vuelta al yacimiento a través de ellos. La salmuera remanente se regresa al yacimiento mediante estos pozos, o bien se manda a un sistema de uso directo antes de inyectarse

### ✓ Pozos del campo Geotérmico Tres Vírgenes

En el caso del campo Geotérmico Tres Vírgenes se muestra en la siguiente tabla los datos de los pozos que han sido perforados, incluyendo los aun activos y aquellos que se encuentran fuera de servicio.

Pozo	Localización Longitud [grados]	Localización Latitud [grados]	Elevación [m]	Profundidad máxima medida [m]	Comentarios del pozo
LV-1	109.43962	27.528529	741	1890	Pozo Productor (inactivo)
LV-11	-112.5592	27.507728	745.3	2081	Pozo Productor desviado (a partir de 600m)
LV-13D	-112.544	27.493749	737	2306	Pozo productor desviado (a partir de 1071.0m)
LV-2	109.43651	27.531453	684	1291	segunda intervención (pozo inyector-inactivo)
LV-4	-112.5563	27.509147	720.43	2500	Pozo productor más profundo
LV-5	109.43921	27.528278	739	1859	Pozo Productor (utilizado como pozo inyector)
LV-6	-112.5589	27.507953	743	2505	Pozo productor
LV-7	109.46649	27.499378	523.06	1925	Pozo inyector intervenido con pescado a los 1860m
LV-8	109.4563	27.520796	725	1715	POZO INYECTOR

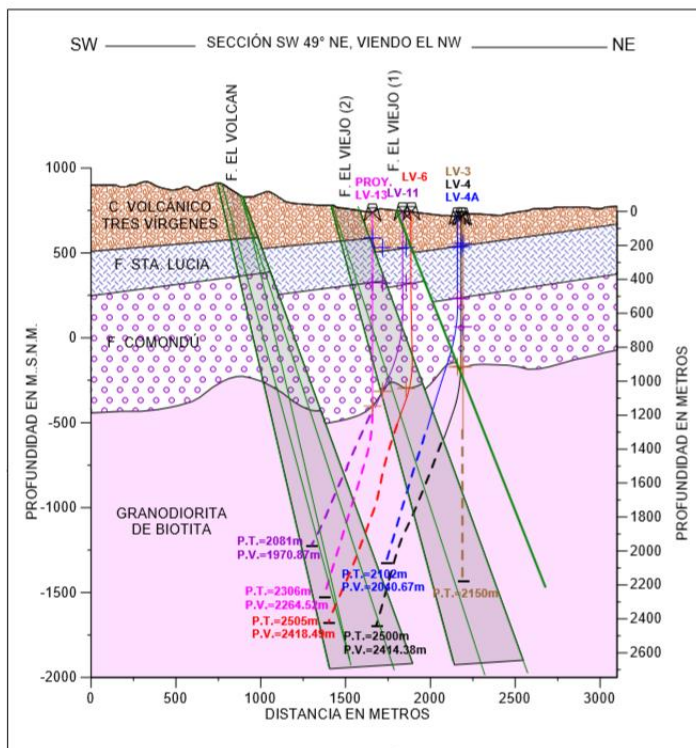
Tabla 2-1 Datos de los pozos del campo Geotérmico Tres Vírgenes.

## 2.4 El Pozo Productor LV-6

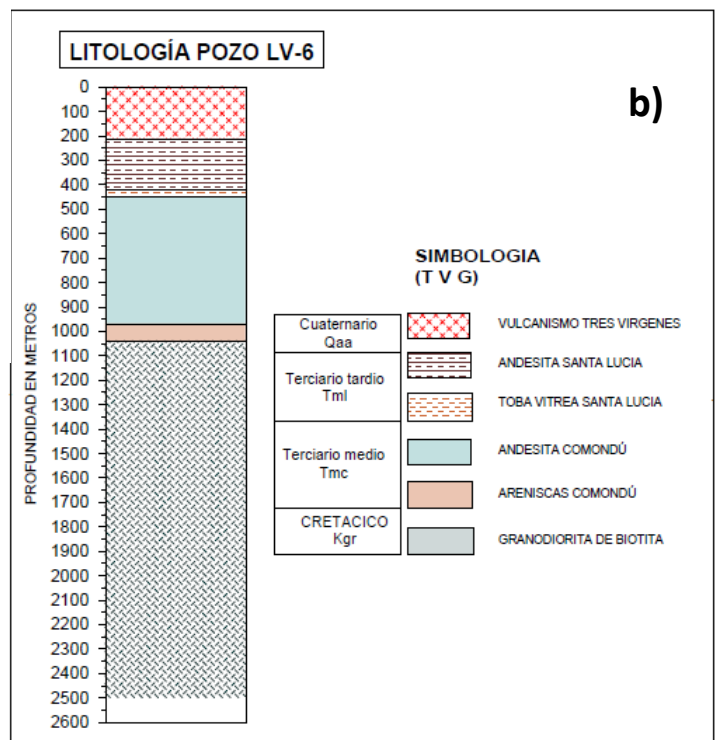
En el presente trabajo se relaciona en aumento de actividad sísmica en el periodo en el cual se realizó la perforación y estimulación ácida del pozo LV-6, el cual fue perforado el día 25 de junio de 2009 y terminó el 24 de diciembre del mismo año, alcanzando una profundidad de 2505 m. El pozo LV-6 se encuentra ubicado en la porción sur de campo, al sureste de los volcanes El Azufre, El Viejo y El Partido, al norte del pozo LV-13, al suroeste del pozo LV-4 y 3, (Figura 2.5) teniendo las coordenadas UTM siguientes: X=346025 Y=3 043498 Z=745 m.s.n.m

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

De acuerdo con el proceso de perforación del pozo LV-6, se estableció la siguiente columna litológica del pozo, de acuerdo con las muestras de núcleo realizadas en el proceso y a la correlación litológica del pozo LV-11 para los intervalos faltantes donde no fue posible obtener recortes de roca debido a las pérdidas de fluido durante la perforación. Se determina que la columna litológica está compuesta por 4 formaciones geológicas conocidas como Vulcanismo Tres Vírgenes (Qaa); Formación Santa Lucia (Tml) constituida su cima por andesitas y su base por tobas; Formación Comondú (Tmc) formada su cima por andesitas y su base por areniscas y Granodiorita de Biotita. Las edades de dichas formaciones oscilan del Cretácico al Cuaternario (Figura 2.4).



a)



**Figura 2.4** (a) Correlación columna litológica y pozos circundantes; (b) Columna litológica del pozo LV-6.

### 2.4.1 Procesos De Perforación Y Estimulación Ácida Del Pozo LV-6

Tomando en cuenta el informe final de resultados de la perforación Y estimulación ácida del pozo LV-6 realizado por CFE y SCHLUMBERGER, se consideró la información de dicho informe para conocer los procesos por los cuales se realizó la estimulación, de manera que facilite la relación del mismo con la sismicidad del campo Geotérmico.

La siguiente tabla muestra un resumen de los procedimientos por los cuales se llevó a cabo todo el proceso de perforación y estimulación de dicho proceso.

Datos del pozo LV-6	
Procedimiento	Especificaciones
Perforación	Inició el día 25 de junio de 2009 y terminó el 24 de diciembre del mismo año, alcanzando una profundidad de 2505 m. El último metro se perforó a las 13:30 del día 16 de diciembre, comenzando los reconocimientos de agujero y lavado de pozo.
Geología	Considerando los resultados de los estudios megascópicos y petrográficos , así como la correlación litológica del pozo LV-11 para los intervalos de 30 a 58m, de 68 a 100m, de 120 a 414m, de 1040 a 1252m y de 1297 a 2505m de profundidad donde no fue posible obtener recortes de roca debido a las pérdidas de fluido durante la perforación del pozo LV-6, se determina que la columna litológica está compuesta por 4 formaciones geológicas (descrita en el capítulo 2).
Registros durante la Perforación	Con equipo mecánico Kuster se hicieron mediciones de temperatura y presión a las profundidades de 1247m y 2500m estando el pozo con lodo de perforación.
Prueba de Inyección-Recuperación	El objetivo de esta prueba es determinar la transmisibilidad y el factor de daño en la formación de pozo, generado por los lodos y recortes de perforación, la prueba se programó con inyección a dos gastos 40, 80 y 120 t/h.
Pre-Acidificación	Inicio de enfriamiento de pozo bombeando agua geotérmica por baches de 2, 4 y 6m <sup>3</sup> desplazando el volumen del pozo, posteriormente inyección continua con gasto de 15t/h incrementando gradualmente hasta llegar a un gasto de 130 t/h. Con pozo inyectando 130 t/h durante 24 horas, se realiza registro Presión-temperatura para asegurar el enfriamiento a 120 °C de las zonas a limpiar mediante la inyección de ácidos.



## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

Inyección de Ácidos	La estimulación ácida en una matriz, incrementa la capacidad de producción del pozo, mediante la eliminación de la resistencia en las paredes de la formación y el daño en sus inmediaciones.
Post-Acidificación	Con la finalidad de valorar le efectividad de la limpieza de pozo LV-6 realizada mediante ácidos, se programa una prueba de inyección a un gasto seguido de una etapa de recuperación de presión del pozo.
Producción	Una vez terminada la acidificación del pozo, se inician los trabajos de quebrado de tubería de perforación, desmantelamiento de preventor, terminación de instalaciones superficiales para la inducción del pozo.
Inducción del Pozo	La inducción se realizó mediante el método de inyección de aire, estando el equipo de la compañía perforadora instalado. El periodo de inducción con inyección constante de aire abajo del nivel hidráulico abarcó del 02 al 04 de enero, inyectando aire a diferentes profundidades. El 4 de enero a las 07:30 horas se retira aire fluyendo el pozo por si solo con una presión de cabezal de 0,5bar y gasto de agua de 20,9 t/h.

**Tabla 2-2** Información de los procesos del pozo LV-6.

Considerando todos estos procesos, así como sus fechas de inicio y en algunos casos su duración, se pudo realizar una tabla especificando dichos procesos a mayor detalle, de manera que se pueda visualizar de manera más fácil.

Como se muestra en la Figura 2.4 se generalizaron los procesos del pozo, en los cuales se consideró 5 procesos principales los cuales consisten en: 1) Perforación Física del pozo: el cual abarca un periodo del 25 de Junio del 2009 al 16 de diciembre del 2009, 2) Simulación: en este periodo se realiza del 16 al 27 de diciembre, este se considera el proceso más importante ya que abarca toda la estimulación ácida del pozo , 3) Válvula reguladora: periodo que estuvo el pozo bajo la válvula de aproximadamente del 27 de diciembre del 2009 al 2 de febrero del 2010, 4) Placa de orificio: una vez quitando la válvula el pozo se mantuvo en placa de orificio del 2 de febrero al 15 de mayo del 2010, 5) Producción con 4": se integró al sistema de generación comercial el día 15 de mayo de 2010, fluyendo por orificio de 0,1016 m (4") con una producción de vapor de 24 t/h.

En el Proceso de simulación como se puede observar abarca desde el lavado del pozo hasta la inyección de ácidos y la post acidificación, una vez terminada la acidificación del pozo, se inician los trabajos de quebrado de tubería de perforación, desmantelamiento de preventor, terminación de instalaciones superficiales para la inducción del pozo.

# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

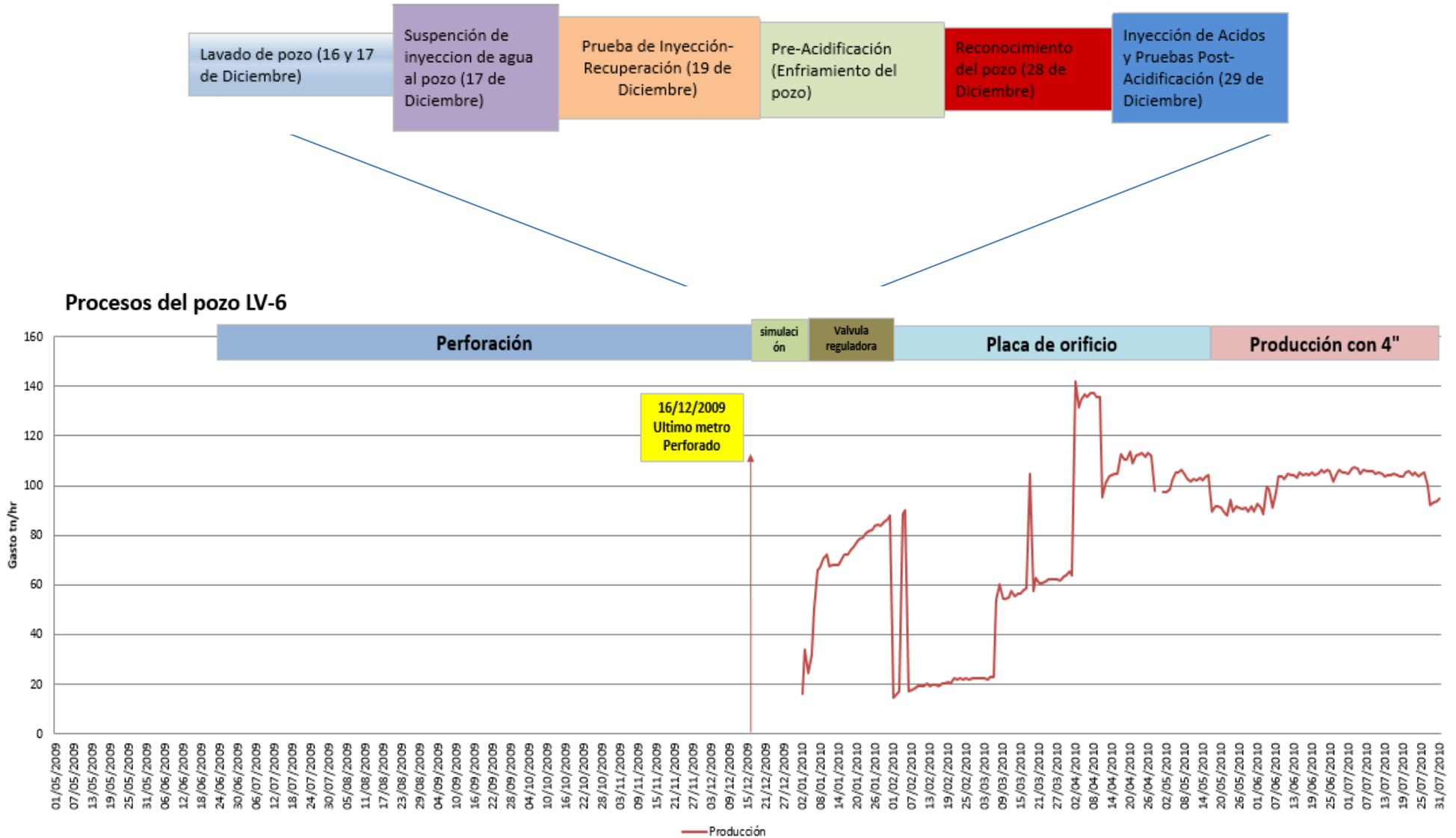


Figura 2.5 Gráfica que muestra la producción del pozo LV-6, en la cual muestra los procesos mencionados anteriormente en la Tabla 2-2.

## Capítulo 3 PROCESAMIENTO DE DATOS

### 3.1 Metodología

#### 3.1.1 Selección Y Estadística De Eventos

Los eventos considerados en el conteo fueron obtenidos de la estación TV01 (Figura 3.1) debido a que dicha estación se encuentra dentro de nuestra zona de interés, además de que presenta un menor ruido de fondo, por estar ubicado sobre un afloramiento rocoso, ubicada aproximadamente a 2.5 km de nuestra zona.

Una vez considerados los datos digitales obtenidos de las estaciones sísmicas localizadas en el campo Geotérmico Tres Vírgenes, se realizó la visualización con la aplicación Drumplot del programa SCREAM, DrumPlot es una pantalla de utilidad de impresión que presenta los datos sísmicos como una página por 24 horas, los datos se dibujan en 24 filas de una hora cada uno (Figura 3.2), de manera que se logrará una lectura óptima de la información. Se toma como base una estación diagnóstico, como se mencionó anteriormente en este caso se tomó como referencia la estación TV01, se procede con la identificación de los eventos sísmicos, para ello se requiere desplegar los registros en forma de “tambor sísmico” (Figura 3.2). Una vez identificados los eventos en el tambor se aíslan y se guardan para analizarlos simultáneamente con la misma señal de las diferentes estaciones activas.

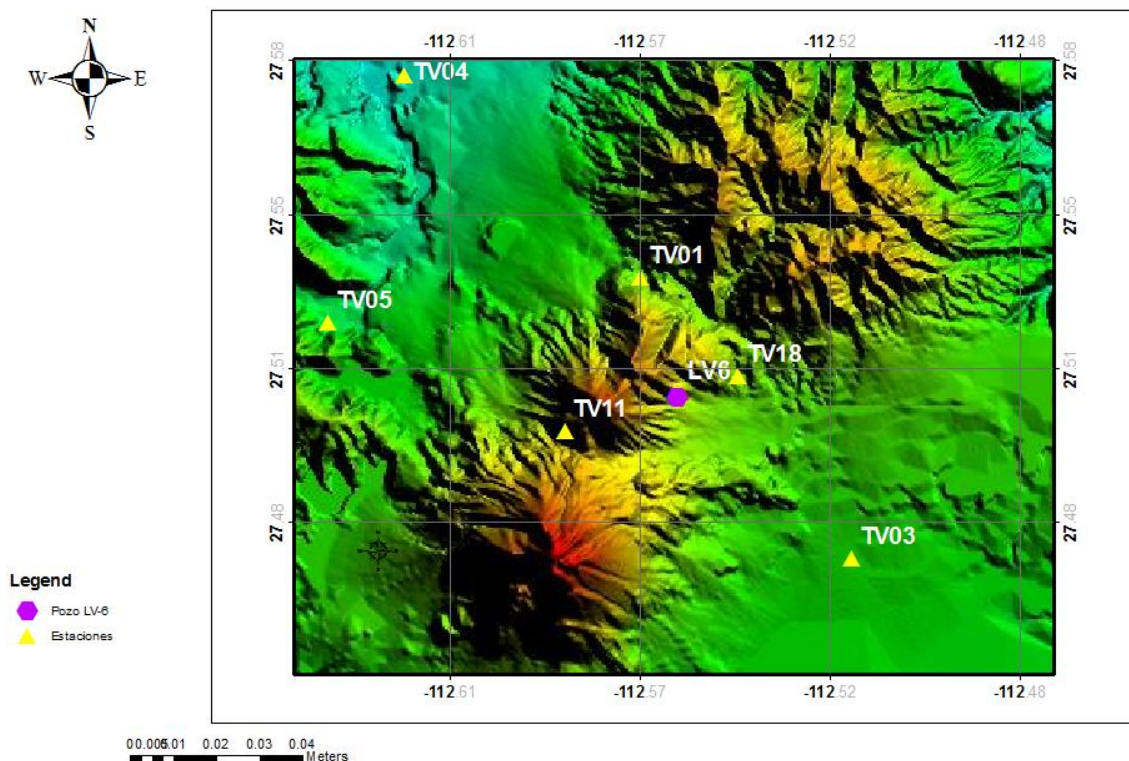
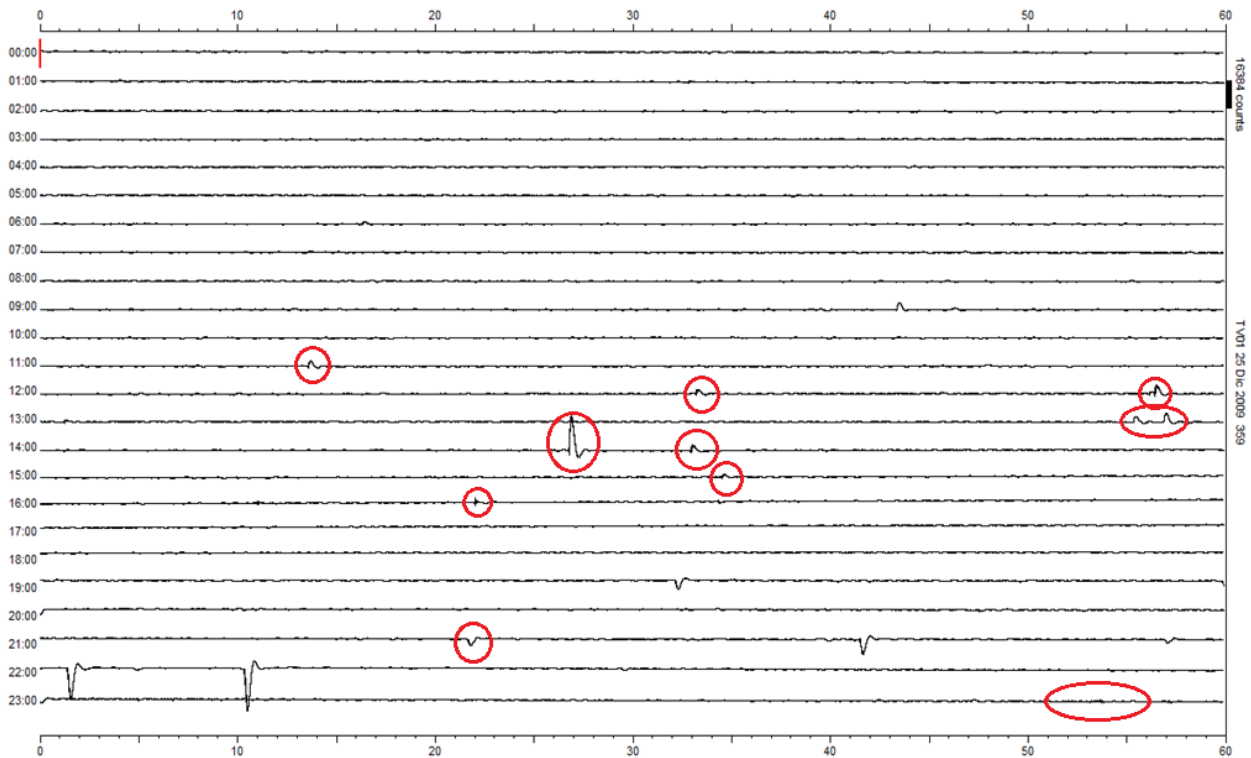


Figura 3.1 Mapa que muestra el Campo Geotérmico, ubicación del pozo, y las estaciones más cercanas.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.



**Figura 3.2** Tambor de la estación TV01. Se han encerrado en círculos rojos los eventos visiblemente identificados para su posterior procesamiento.

En este tambor se muestra un ejemplo de la visualización del programa Drumplot del día 25/12/2009, donde se ha resaltado 10 sismos locales en la estación de diagnóstico TV01 (1541) en los círculos rojos, por excepción del encerrado a las 23:00 el cual al visualizar hora por hora en el Software Scream 4.5, se pueden ver eventos de menor amplitud los cuales en el tambor no se pueden visualizar claramente.

Ya a que se presentan eventos que no se visualizan en este programa, se revisó hora por hora de los datos en crudo, con ayuda del Software Scream 4.5, que nos permite monitorear y visualizar los archivos GCF pregrabados, de esta manera se pudieron localizar eventos de menor amplitud, y poder realizar una estadística más detallada con respecto del número total de eventos sísmicos asociados al proceso de Perforación y Estimulación ácida del pozo LV-6.

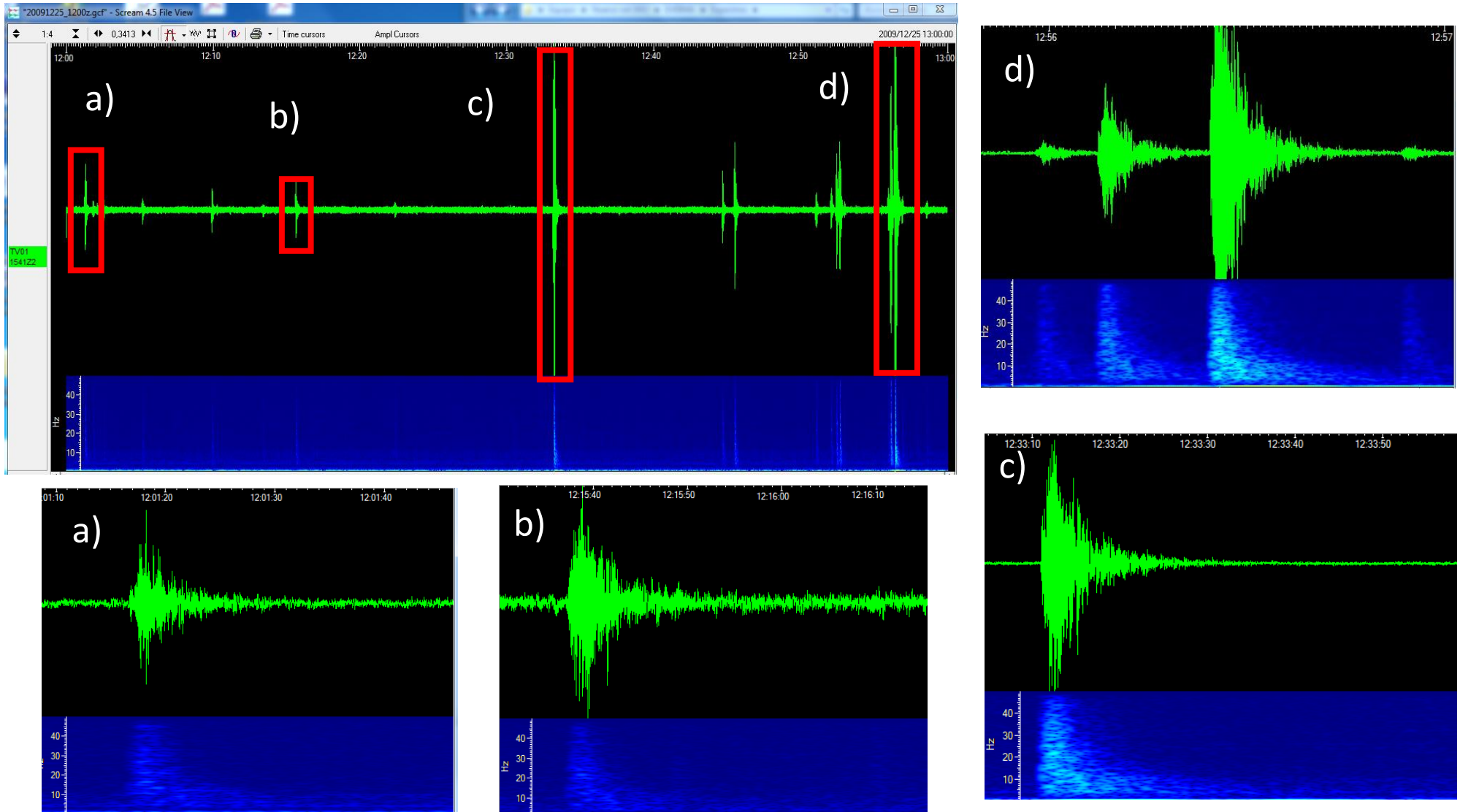
También con ayuda de este Software se pudo identificar las señales de los eventos registrados, de manera que se pudiera asignar el tipo de evento sísmico, ya sea local, regional o distante (hasta 4 segundos de S-P evento sísmico local, hasta 16 segundos evento regional y después de 16 segundos evento distante o telesismo).

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

En la Figura 3.3. se muestra un ejemplo del programa utilizado, de manera que se observe la cantidad de eventos registrados el día 25/12/2009 a las 12:00hrs, en esta imagen se consideró uno de los días en los cuales se presentó mayor número de eventos registrados, en cual podemos observar cerca de 21 eventos, y en la cual se percibe los eventos de menor amplitud como es el caso de la figura 3.3 a) y b), los cuales a simple vista presentan una forma de onda y espectrograma similar al evento de la figura 3.3 c) la cual tiene mayor amplitud, sin embargo se observan eventos aún más pequeños de los cuales se pierde muchas de las propiedades del evento sísmico, al igual se presentan eventos que llevan una secuencia uno tras otro como se muestra en la figura. d) en la cual se visualiza tres eventos de los cuales va en aumento su intensidad y amplitud y mostrando un decaimiento en el cuarto evento. En la figura. 3.3, También contiene su espectrograma en el cual en los eventos de mayor amplitud (figura.3.3 c) y d)) se pueden observar mejor que los de menor amplitud (figura.3.3 a) y b)), sin embargo se puede ver a simple vista la similitud de acuerdo a su forma de onda y espectrograma el cual nos muestra una frecuencia mayor aproximadamente de 10 a 20 HZ, de manera que se podrán asociar a un mismo origen, esto se resaltará más a detalle más adelante.

# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

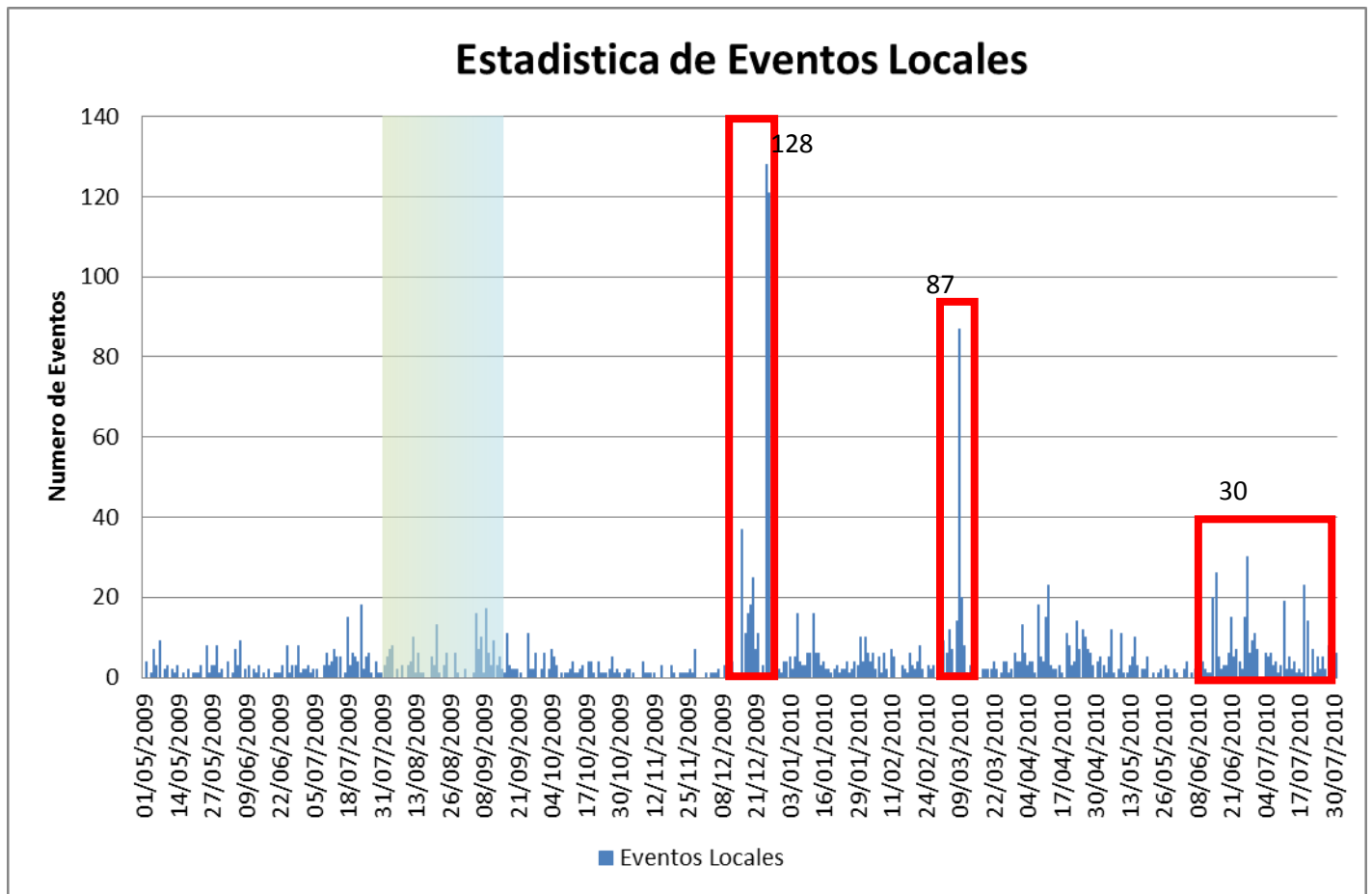


**Figura 3.3** Muestra la secuencia de eventos en una hora del día 25/12/2009 en la cual se puede observar los eventos de menor amplitud junto con su espectrograma.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

Tomando en consideración lo antes mencionado se registraron un total de 2021 eventos locales, 662 eventos regionales y 16 eventos distantes. De dichos eventos se tomaron los eventos locales que contaran con un mínimo de tres estaciones y fueran lo más claros posibles.

A continuación se muestra la estadística final, tomando en consideración lo descrito anteriormente, relacionada con los procesos de perforación y estimulación ácida del pozo LV-6 con mayor detalle.



**Figura 3.4** Muestra toda la sismicidad registrada en nuestro periodo de interés en nuestra estación diagnóstico TV01, mostrando en la sombra el periodo donde no se registró información de dicha estación.

Finalizando con esta gráfica se puede observar los aumentos considerables en la sismicidad, los cuales se encuentran marcados en cuadros rojos. En nuestro primer recuadro se observa un incremento en la sismicidad del 16 al 29 de diciembre, iniciando con un número de sismo de 36 llegando a un máximo de número de sismo de 128 el día 25 de Diciembre, en nuestro segundo recuadro corresponde al día 9 de Marzo del 2010 en el cual presentó un número de sismo de 87 eventos en ese día, y por último tenemos un tercer recuadro en cual se abarca un periodo del 14 de Junio del 2010 hasta el 30 de Julio del mismo año, el cual se llega a presentar de 1 hasta 30 eventos sísmicos en este periodo.

### 3.1.2 Correlación De Estadística Con Los Procesos De Perforación Y Estimulación Ácida Del Pozo

De acuerdo con la información obtenida anteriormente respecto de la sismicidad y los procesos de la Perforación y Estimulación Ácida del Pozo LV-6 se puede hacer una relación con respecto de los cambios significativos de la sismicidad con dichos procesos, y de esta manera poder identificar aquellos eventos de mayor interés en nuestro estudio y delimitar nuestra zona de interés.

Como se puede observar en la Figura 3.4. Se resaltaron tres incrementos en la sismicidad de gran importancia, que de acuerdo con los procesos de Perforación podemos asociarlos a dichos procesos, de acuerdo con la imagen estos procesos se relacionan de la siguiente manera:

Cambio significativo de la sismicidad	Periodo	Proceso
1.-Simulación	16-19 de Diciembre	En este periodo se abarcan los procesos de Lavado de pozo, suspensión de inyección de agua, Prueba de inyección-Recuperación, Enfriamiento del pozo, Inyección de ácidos y Pruebas Post-Acidificación.
2.-Placa de orificio	7 de Marzo del 2010	En marzo se abre la descarga equivalente a 0,152 m (6") para efecto de determinar la producción máxima del pozo
3.- Producción 4"	14 de Junio al 30 de Julio del 2010	La capacidad de producción del pozo por orificio de 010 m (4") después de la estimulación ácida alcanza las 24,7 t/h de vapor @ 13 bar de presión de cabezal

**Tabla 3-1** Muestra los Procesos relacionados con los cambios significativos de sismicidad.

De tal manera que de acuerdo con estos procesos, consideramos de mayor interés para nuestro estudio el cambio más significativo en el aumento de la sismicidad, relacionado con la Simulación Ácida del Pozo LV-6, del cual se estudiara a más detalles los procesos descritos en la tabla 3.2. Para determinar los eventos inducidos por cada uno de estos procesos, en cuál de todos afectó de manera más significativa al campo Geotérmico Tres Vírgenes. Después de estos procesos se continuó con la Acidificación y las pruebas post-acidificación las cuales presentan poca actividad sísmica. El 02 de enero del 2010 se inició la inducción del pozo LV-6 mediante el método de inyección de aire, con gastos de agua pequeños, el pozo comenzó a fluir por sí mismo, con un gasto de agua de 20 t/h, como se muestra en la figura 3.5 en este periodo el pozo estuvo en condiciones



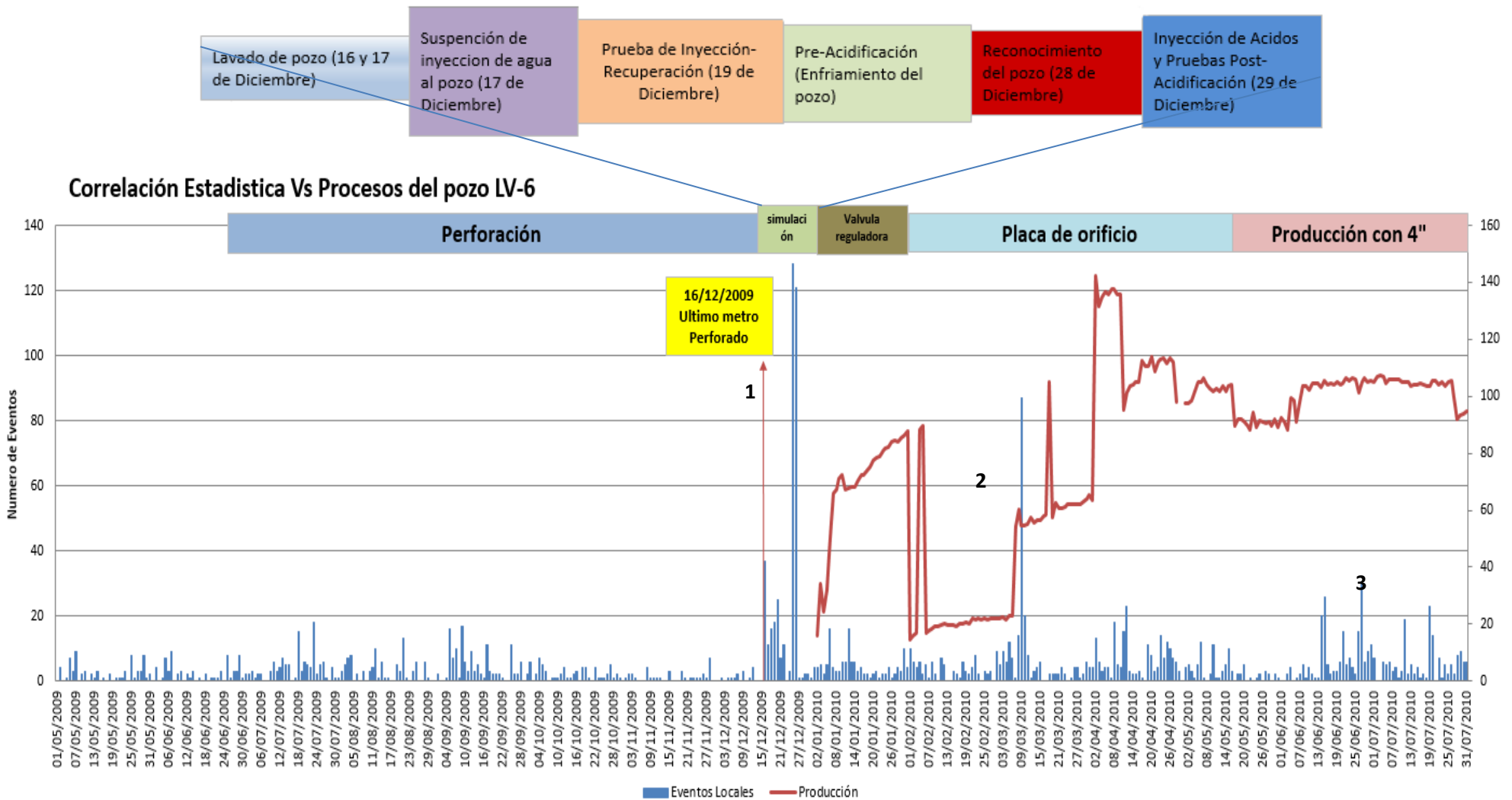
## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

de válvula regulada hasta el 02 de febrero de 2010, después de esta fecha ha estado fluyendo con placa de orificio.

Una vez seleccionado nuestro periodo de interés se realizó una gráfica en la cual se muestra día a día los procesos ocurridos durante el procesos de Estimulación del pozo LV-6 (Figura 3.5), demostrando que los días de **mayor sismicidad** se encuentran asociados al **Enfriamiento del Pozo** en el cual se bombeo agua geotérmica por baches de 2, 4 y 6 m<sup>3</sup> desplazando el volumen del pozo, posteriormente inyección continua con gasto de 15 t/h incrementando gradualmente hasta llegar a un gasto de 130 t/h. Esto se pudo determinar al realizar una tabla más específica abarcando del 16 de Diciembre del 2009 hasta el 31 de Diciembre del 2009 (figura 3.10), en la cual se aprecia detalladamente los procesos ocurridos en dichas fechas de acuerdo con el informe final realizado por CFE y SCHLUMBERGER, además de mostrar la sismicidad registrada en la estadística elaborada (barra azul) y los eventos localizados (barras rojas).

# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.



**Figura 3.5** Gráfica que muestra la relación del proceso de perforación, pruebas de simulación, acidificación, de válvulas e integración a la producción del pozo LV06 Vs la sismicidad local diaria cuantificada en la estación TV01 (la Residencia).

## 3.2 Procesamiento Y Localización De Los Eventos Sísmicos

Durante el proceso de selección y estadística de los eventos sísmicos registrados entre el 25 de junio 2009 y Julio del 2010, se observaron que 2021 sismos fueron registrados en 3 y 4 estaciones sísmicas, tomando como base la estación TV01, debido a que esta estación presenta un menor ruido de fondo, por estar ubicado sobre un afloramiento rocoso. Para la selección de estos eventos registrados se procedió a seleccionar únicamente eventos locales de S-P menores a 4 segundos y de esta manera discriminar los regionales, lejanos, armónicos y ruido. De los 2021 sismos registrados en la estadística, se pudieron localizar 365 eventos sísmicos de acuerdo al periodo de junio del 2009 a mayo del 2010. En total de estos 365 se seleccionaron 187 sismos locales. Con estos sismos se elaboró la base datos CFE09 dentro del programa Seisan 9.1 descrito por Havskov and Ottemoller, 2012.

### 3.2.1 Programa De Localización

El programa de localización utilizado en el presente estudio es el SEISAN versión 9.1 (Havskov and Ottemoller, 2012) y utiliza como datos de entrada: nombre de la estación, coordenadas geográficas (latitud y longitud), elevación de la misma, la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P ( $T_p$ ), S ( $T_s$ ), la duración total del sismo (C), una relación de velocidad ( $V_p/V_s$ ), un modelo de velocidad y una ecuación para el cálculo de la magnitud de duración. Para la visualización de las señales sísmicas, lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S y coda, se consideró el siguiente procedimiento:

- Se analiza el sismograma en sus tres componentes (componente vertical Z y las dos componentes horizontales NS, EW) de cada una de las estaciones de la red sísmica.
- Se procede a identificar el instante en que aparecen las fases P y S del sismograma, la lectura del tiempo de llegada de la ondas P se lee en la componente vertical y la fase S en las dos componentes horizontales, este proceso se efectúa para cada una de las estaciones sísmicas y luego de ejecutar un simple comando se obtiene la localización en coordenadas geográficas y profundidad.
- Además de realizar este procedimiento, en la componente vertical del sismograma se lee e identifica el instante en que la duración de la Coda termina, el programa nos arroja como resultado la magnitud  $M_c$  del sismo.

En la figura 3.6 del lado izquierdo se puede observar la manera en que seisan visualiza los eventos sísmicos, mostrando en número asignado a cada estación del campo Geotérmico Tres Vírgenes. En el lado derecho de la misma figura se muestra las tres componentes de dicho evento, la fecha y hora del evento, además de que nos permite un acercamiento para mayor exactitud al momento de seleccionar la lectura de las ondas P, S y Coda.

# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

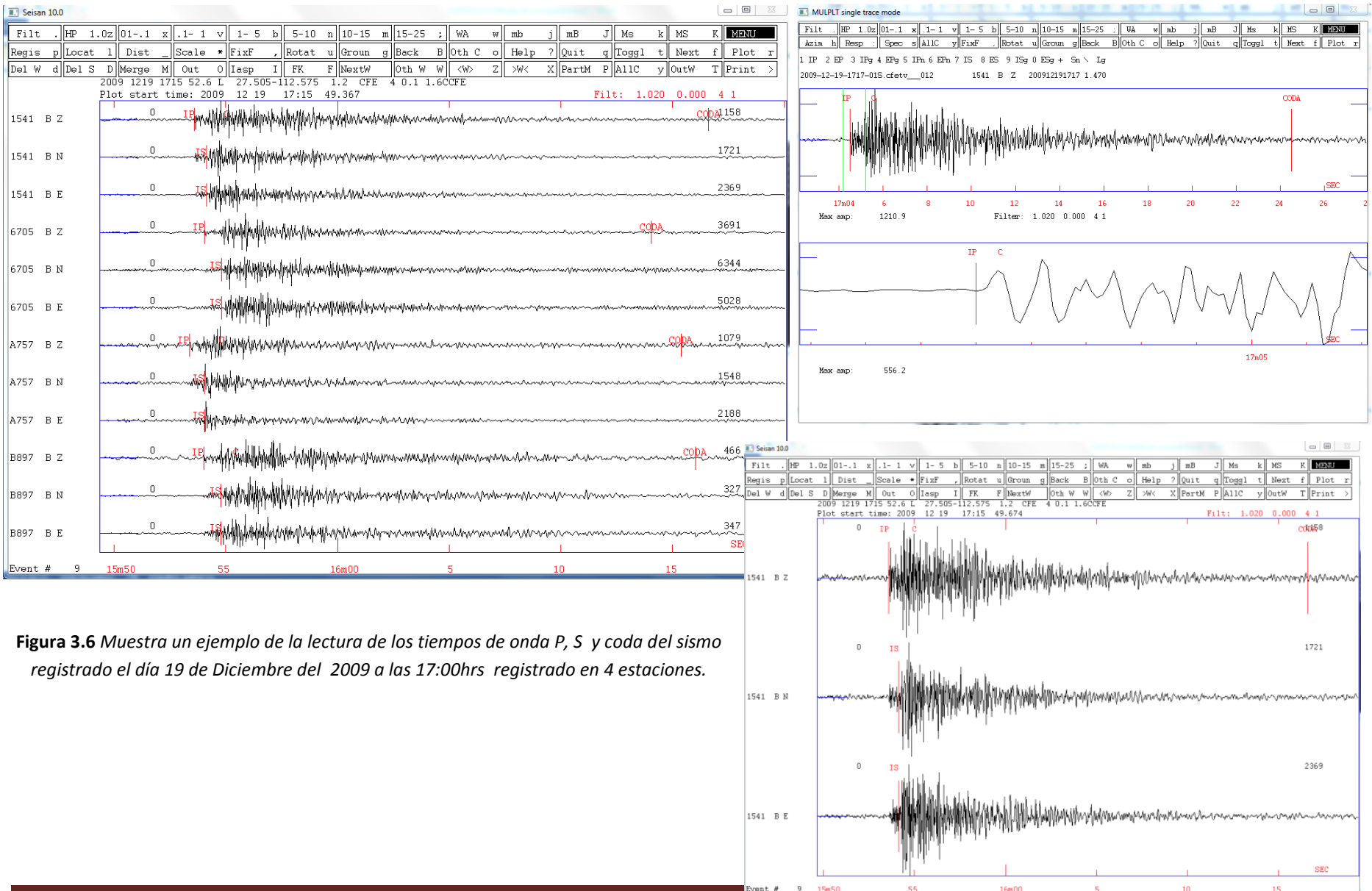


Figura 3.6 Muestra un ejemplo de la lectura de los tiempos de onda P, S y coda del sismo registrado el día 19 de Diciembre del 2009 a las 17:00hrs registrado en 4 estaciones.

### 3.2.2 Modelo De Velocidad

Para el presente estudio se ha utilizado el modelo de velocidad presentado en la Tabla 2, el cual ha sido modificado a partir del modelo que utilizó Rodríguez et al. (2000) en el estudio de la actividad sísmica dentro del campo geotérmico durante el periodo Enero a Junio de 1999.

VELOCIDAD 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	11.000
8.200	25.000

*Tabla 3-2 Modelo de velocidad utilizado en el presente estudio. Vp, velocidad de la onda P.*

### 3.2.3 Ecuación Para El Cálculo De La Magnitud De Duración

Es importante que cada región o campo geotérmico tuviera su ecuación para calcular su magnitud, ya que este varía de acuerdo con las características de los sedimentos o rocas, sus espesores y las estructuras presentes, sin embargo se requerirá un mayor número de sismos para lograr este objetivo. Por el momento, se tomará la siguiente relación propuesta por Havskov y Macías (1983), la cual fue elaborada para la zona volcánica del eje Neovolcánico:

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

Donde: Md es la magnitud de duración en grados corregida a partir de la ecuación propuesta por Lee et al. (1973), T es la duración total del sismo en segundos y D la distancia epicentral en kilómetros

En general, la lectura de los tiempos Ts y Tp fueron realizados con una precisión de aproximadamente 0.4s. La relación de velocidades Vp/Vs utilizada para la localización ha sido obtenido a partir de las curvas de Wadati realizadas año por año, obteniéndose así, un valor promedio de Vp/Vs=1.76.

### 3.2.4 Localización Hipocentral

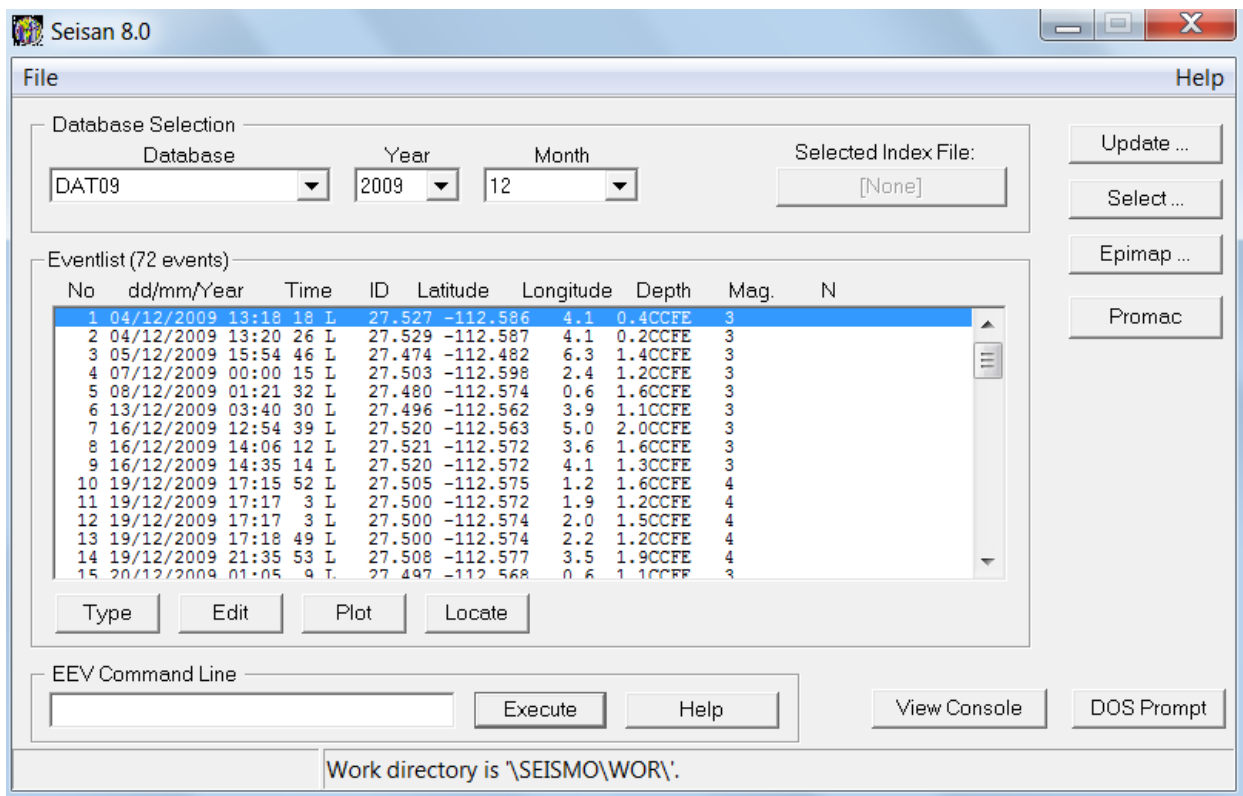
Con la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S, realizadas en todas las estaciones disponibles, duración total del sismo, modelo de velocidad y relación de velocidades se obtuvo los

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

parámetros hipocentrales de 187 sismos (Tabla 3.4). En la Figura 3.7, se muestra un ejemplo de la localización hipocentral; es decir los resultados numéricos del epicentro (latitud, longitud), profundidad del hipocentro (depth) y magnitud Mc.

Los resultados obtenidos de la localización muestran:

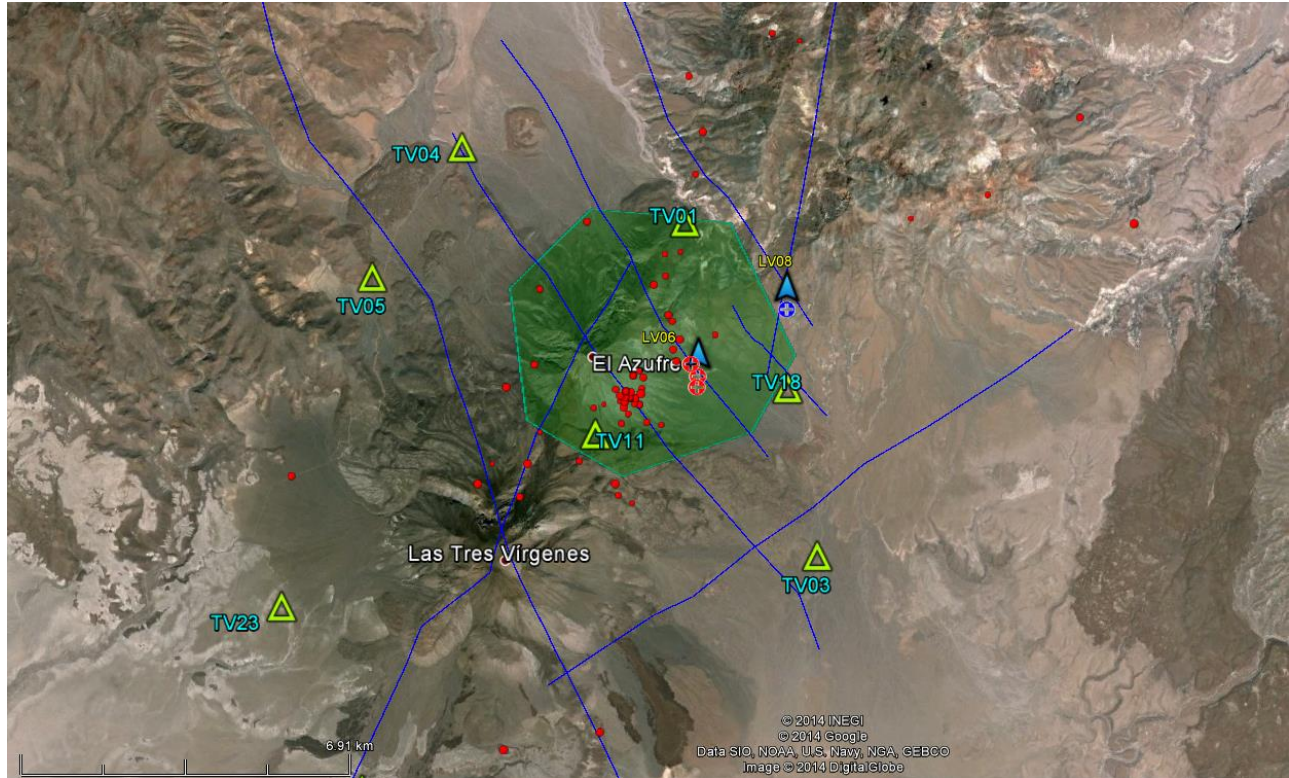
- ✓ Los errores de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) menores a 2 y 3.5 km para los sismos localizados con 4 y 3 estaciones respectivamente.
- ✓ Los eventos localizados del periodo 1, no sobrepasan los 7 km de profundidad, los eventos del periodo 2 no sobrepasan los 5 km de profundidad y los eventos del periodo 3 no llegan a sobre pasar los 8 km de profundidad.
- ✓ La magnitud de los sismos son del orden de 0.2 a 3.2 Mc.



**Figura 3.7** Consola del programa de localización Seisan, donde muestra los eventos de diciembre del 2009 el cual muestra su localización (latitud y longitud), profundidad y Magnitud.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

De la Figura 3.5 que relaciona el número total de eventos sísmicos con la perforación y estimulación ácida del pozo LV-6, se consideró una visualización de los eventos que habarcan el año 2009 en cual muestra la zona donde hay mayor sismicidad.



**Figura 3.8** Zona de estudio sombreada en color verde, tomando en cuenta los eventos dentro de la misma del periodo abril a diciembre 2009.

De acuerdo con lo descrito en Figura 3.5. se puede observar la mayor sismicidad en el proceso de enfriamiento del pozo realizada a partir del 25 al 26 de diciembre, ya obtenida esta información se realizó la localización previa de los eventos seleccionados en los procesos de simulación, inicialmente se desecharon aquellos eventos que no contaban con claridad en alguna de las estaciones por mismo motivo dificultaban la identificación de onda P y S. Una vez habiendo localizado la mayor cantidad de eventos posibles, se estableció un límite de tolerancia en la zona de estudio para ello es necesario hacer una localización preliminar para graficar los sismos en el sitio de internet Google Earth con el fin de visualizar su ubicación geográfica y seleccionar aquellos sismos que se encuentren dentro de la cobertura acimutal de la red sísmica y de los eventos cercanos al pozo de nuestro interés, de esta manera aumentará la precisión en la localización de los sismos seleccionados.

En la Figura 3.8 se muestra sombreada la zona de estudio donde sólo se tomaran en cuenta los sismos que se encuentren dentro de ella. El perímetro de esta zona de estudio fue delimitado aproximadamente por las tres estaciones más cercanas al pozo de interés, LV-6. De los 187 eventos

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

localizados, 79 sismos (Abril-Diciembre) corresponden a nuestro año de interés (2009). De los cuales 41 de los mismos, fueron los eventos dentro de la zona.

De todos los eventos localizados, se tomó en consideración los eventos en nuestra zona de mayor interés, la cual se relaciona con la estimulación ácida del pozo LV-, los cuales se muestran en la siguiente tabla, Para ver todos los 187 eventos localizados revisar el anexo A.

N° DE SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GTM HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF. (Km)	RMS (s)	Mc (grados)
1	04/12/2009	13:20:26	27.522	-112.584	4.3	0	0.3
2	08/12/2009	01:21:33	27.484	-112.572	1.6	0.1	2.2
3	16/12/2009	12:54:39	27.516	-112.567	4.2	0	1.9
4	16/12/2009	14:06:12	27.521	-112.571	3.7	0	1.9
5	16/12/2009	14:35:14	27.523	-112.569	4.2	0	1.5
6	19/12/2009	17:15:52	27.501	-112.575	2.1	0.1	1.6
7	19/12/2009	17:17:03	27.504	-112.57	3.5	0.1	1.8
8	19/12/2009	17:18:49	27.499	-112.571	3.1	0	1.4
9	19/12/2009	21:35:53	27.501	-112.572	3.1	0	2
10	20/12/2009	01:05:09	27.5	-112.571	1.9	0	1.7
11	25/12/2009	11:13:33	27.501	-112.57	1.5	0	2.6
12	25/12/2009	11:27:56	27.5	-112.571	1.7	0.1	2.1
13	25/12/2009	12:01:15	27.499	-112.574	2	0.1	0.8
14	25/12/2009	12:33:10	27.5	-112.571	3.2	0.1	2
15	25/12/2009	12:45:28	27.504	-112.572	1.5	0.1	1.9
16	25/12/2009	12:56:23	27.499	-112.57	3.4	0	2
17	25/12/2009	13:01:12	27.5	-112.572	1.5	0	1.9
18	25/12/2009	13:55:56	27.5	-112.572	1.5	0	1.2
19	25/12/2009	14:26:44	27.498	-112.573	1.6	0	2.3
20	25/12/2009	14:32:55	27.5	-112.573	1.5	0	1.6
21	25/12/2009	15:34:29	27.499	-112.573	1.8	0	1.9
22	25/12/2009	16:10:59	27.5	-112.571	3	0	1.3
23	25/12/2009	16:21:58	27.5	-112.574	1.7	0.1	1.9
24	25/12/2009	16:34:16	27.499	-112.57	3.4	0	1.6
25	25/12/2009	22:44:34	27.479	-112.59	1.5	0.1	1.7
26	25/12/2009	23:51:59	27.505	-112.571	1.8	0	1.3
27	25/12/2009	23:53:34	27.5	-112.573	1.6	0.1	-0.2
28	26/12/2009	01:37:05	27.502	-112.57	3.4	0	1.5
29	26/12/2009	06:00:55	27.5	-112.573	1.5	0	1.6
30	26/12/2009	06:08:12	27.497	-112.572	1.7	0.1	1.4
31	26/12/2009	06:09:57	27.495	-112.573	1.7	0.1	1.5
32	26/12/2009	07:02:39	27.5	-112.573	1.7	0	2.5
33	26/12/2009	07:03:58	27.496	-112.568	1.5	0.1	1.7



**SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO  
GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.**

34	26/12/2009	07:56:53	27.504	-112.572	1.9	0	1.5
35	26/12/2009	10:12:32	27.501	-112.573	1.5	0	1.4
36	26/12/2009	10:44:36	27.5	-112.572	1.7	0	1.9
37	26/12/2009	15:09:52	27.485	-112.59	1.9	0	2.2
38	26/12/2009	22:34:28	27.501	-112.573	1.7	0.1	2
39	26/12/2009	22:35:22	27.501	-112.573	1.6	0.1	2.1
40	27/12/2009	15:10:35	27.508	-112.564	1.5	0.1	2
41	29/12/2009	14:59:51	27.496	-112.571	1.7	0.1	-0.7

**Tabla 3-3** *Parámetros hipocentrales de los 41 sismos seleccionados de los 187 localizados. La fecha está dado por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora GMT en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof., la profundidad focal en kilómetros; error de la localización RMS, la raíz media cuadrática en segundos, magnitud de duración (Mc).*

### 3.3 Análisis De La Distribución De Los Eventos Localizados En Planta Y Profundidad

Considerando nuestros eventos sísmicos, localizados y habiendo delimitado nuestra zona principal de estudio, se dividieron nuestros eventos en tres periodos para poder identificar los cambios en la sismicidad de acuerdo con el proceso estimulación ácida del pozo LV-6, de manera que nuestro periodo 1 cubre los eventos antes dicho proceso (Junio-noviembre 2009), el periodo 2 cubre el proceso de estimulación ácida (diciembre 2009) y el periodo 3 el cual cubre los procesos después de la estimulación ácida del pozo (Tabla 3.4)

Para la realización de los perfiles de distribución tanto en planta como en profundidad se utilizó el comando epimap del Software Seisan 9.1, dicha herramienta nos permite trazar los contornos del terreno, epicentros, intensidades macrosísmicos, estaciones y contornos de nivel, así como los perfiles de profundidad. Es posible hacer zoom en áreas seleccionadas (opción por Mario Villagrán).

#### 3.3.1 Distribución En Planta Y Profundidad

Teniendo la localización de todo nuestro periodo de interés, se visualizó en SEISAN con el comando de epimap todos los eventos localizados, este comando nos muestra los eventos localizados con su magnitud y profundidad, además nos permite visualizar, las fallas, estaciones y pozos que se encuentran en nuestra zona de estudio permitiendo una mejor visualización del área por medio de perfiles para una mejor interpretación.

En la Figura 3.9 se puede mostrar nuestra zona de estudio con la localización final de los eventos, los cuales se dividieron en tres periodos para facilitar su análisis:

PERIODO	TIEMPO
<b>A) DURANTE LA PERFORACIÓN FÍSICA DEL POZO (AZULES)</b>	JUNIO A NOVIEMBRE DEL 2009
<b>B) DURANTE LA ESTIMULACIÓN ÁCIDA Y MATRICIAL DEL POZO (ROJOS)</b>	DICIEMBRE DEL 2009
<b>C) DESPUÉS DE LA ESTIMULACIÓN Y MATRICIAL DEL POZO (VERDES)</b>	ENERO A MAYO DEL 2010

**Tabla 3-4** Muestran los tres periodos que se consideran con sus respectivos colores de localización.

Contando ya con toda nuestra información, y teniendo en cuenta los parámetros mencionados antes para la localización de los eventos en nuestra zona, se graficó los tres periodos de manera separada de forma que se observara mejor y realizar una mejor interpretación y análisis, en las figuras siguientes se puede observar la localización de nuestros tres periodos en los cuales se podrá observar el límite de la zona de estudio que se consideró de acuerdo con la localización del pozo LV-6.

# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

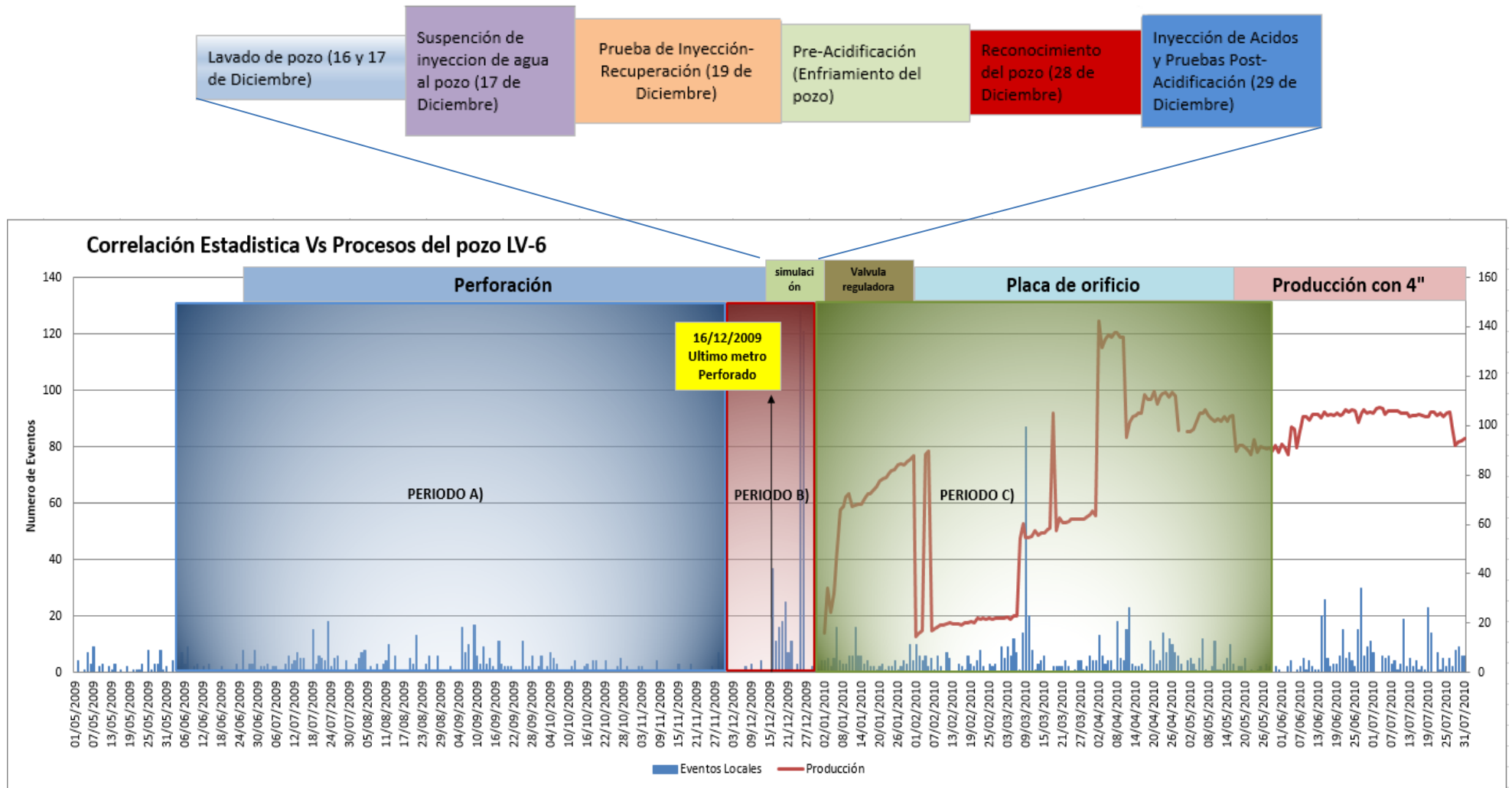


Figura 3.9 Gráfica que muestra la relación del proceso de perforación, pruebas de simulación, acidificación, de válvulas e integración a la producción del pozo LV-6 Vs la sismicidad local diaria cuantificada en la estación TV01, así como los tres periodos seleccionados.

SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

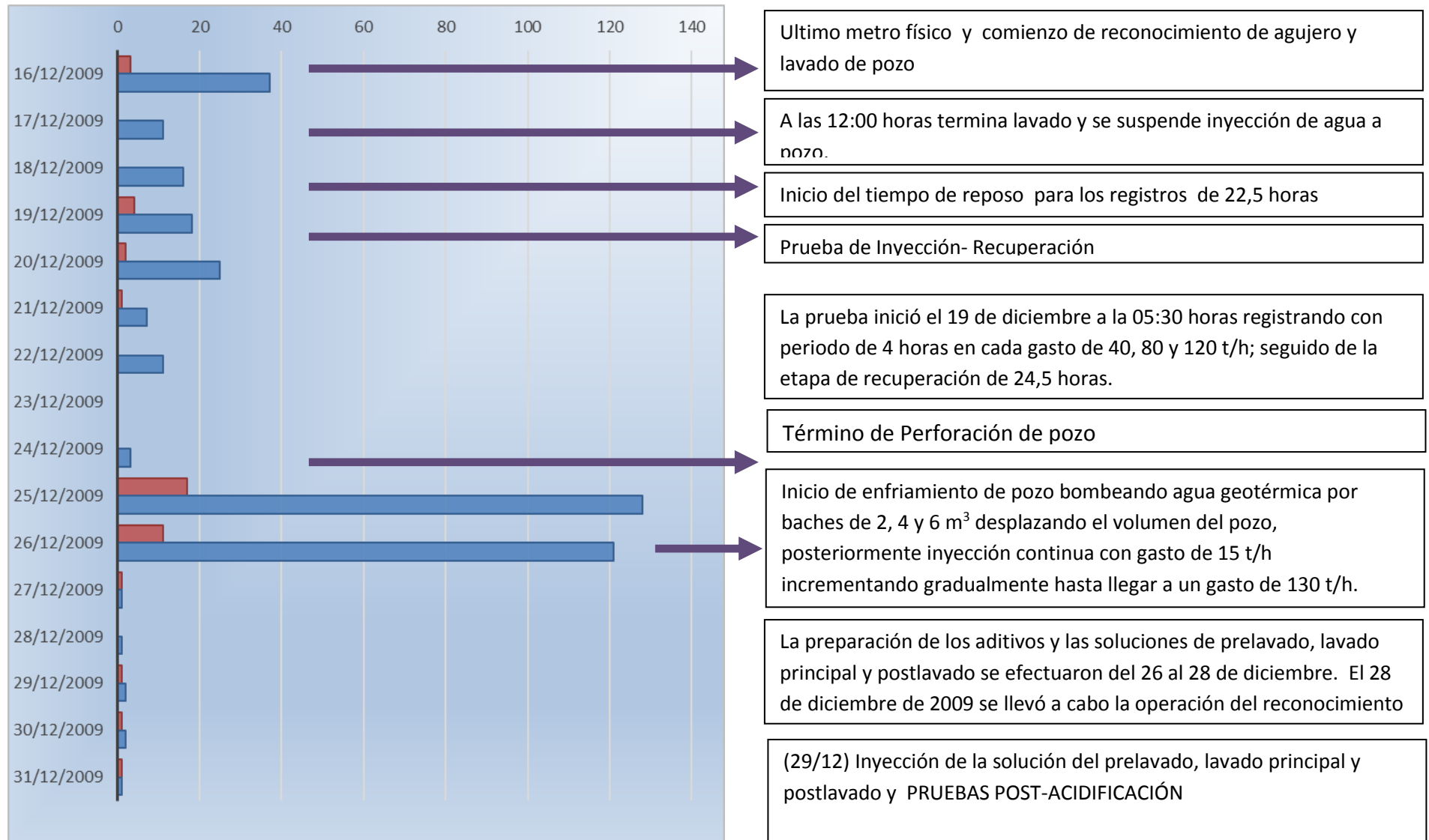


Figura 3.10 Muestra a detalle los procesos realizados del 16 al 31 de Diciembre 2009, que abarca el procesos de simulación, mostrando los eventos localizados (barras rojas) y los eventos registrados (barras azules).

SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

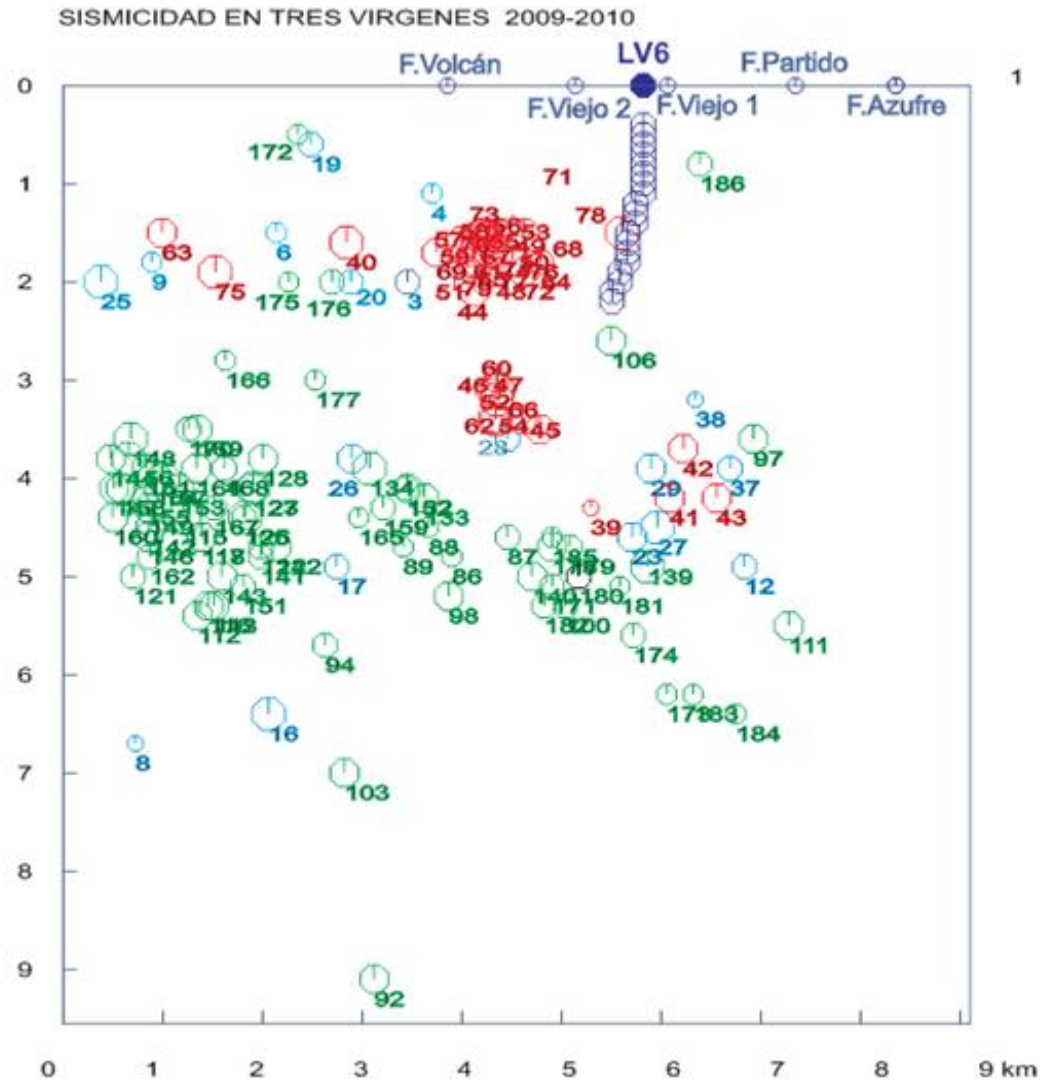
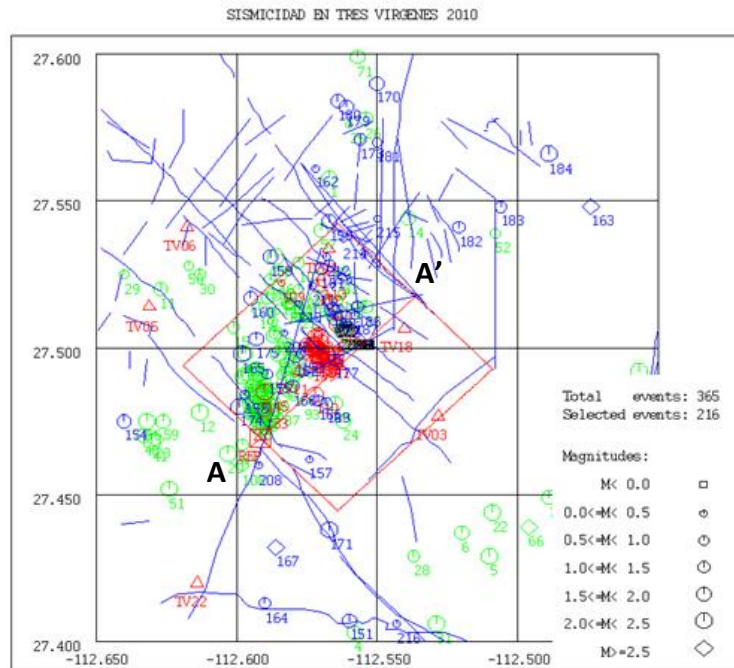


Figura 3.11 Esquema en epimap que muestra toda la sismicidad desde Junio del 2009 a Mayo del 2010, además del límite de nuestra área de estudio (Cuadro rojo), en planta y profundidad.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

En la Figura 3.11. Se puede observar lo descrito anteriormente en la tabla 3.5 en la cual se puede visualizar toda la sismicidad correspondiente al periodo total considerado para el análisis de este trabajo, el cual muestra 216 seleccionados de la base de datos CFETV de los 365 que fueron identificados. De estos 216 nuestra zona delimitada contó con un total de 187 sismos con los cuales se trabajó.

Como también se puede observar que la zona limitada también muestra la dirección del perfil que se tomó en consideración para la distribución de la sismicidad en profundidad para los tres periodos.

Se realizó los perfiles en dirección SW-NE con respecto de su profundidad de modo que se pudiera visualizar el efecto de la sismicidad en cuanto a la localización del pozo LV-6 y de esta manera poder correlacionar los eventos ocurridos en los procesos realizados al pozo.

Se ejecutó una visualización general de los tres periodos juntos y por separado, considerados para este trabajo de manera que se pudo apreciar toda la sismicidad cerca del pozo, en dichos perfiles podemos observar el pozo LV-6, la profundidad en km, así como las fallas que se encuentran en nuestra zona de estudio.

# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

✓ P

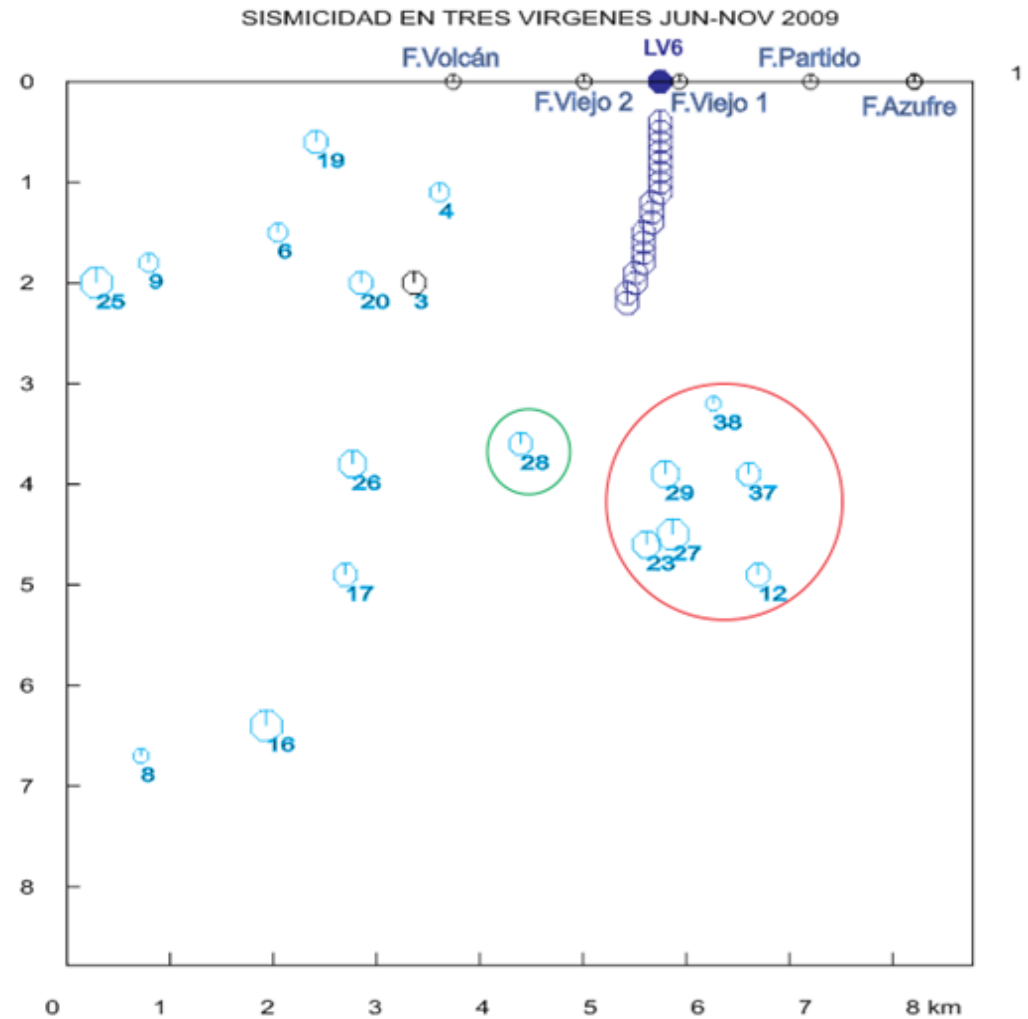
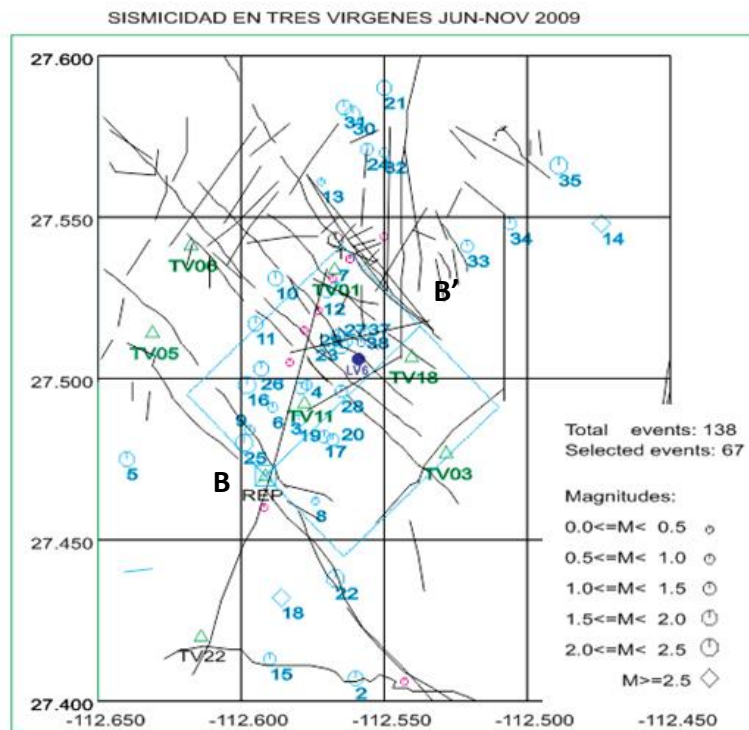


Figura 3.12 Eventos visualizados en epimapa de la sismicidad antes de la estimulación ácida del pozo, abarcando el periodo de Junio- Noviembre 2009 en planta y profundidad.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

En la imagen 3.12.se puede visualizar la sismicidad delimitada en nuestra zona de estudio de nuestro primer periodo, en la cual se observa que la sismicidad se encuentra distribuida alrededor del pozo, relacionando esta imagen con la de los eventos en diciembre del 2009, se tomaron en cuenta ciertos eventos que podrían corresponder con nuestro periodo de perforación del pozo LV-6, dichos eventos se muestran del lado derecho de la misma. La cual nos muestra un perfil SW-NE en cuanto a su profundidad.

De los 67 eventos localizados en este periodo, fueron seleccionados 38 de acuerdo con nuestra zona, de los cuales muy pocos podrían tener relación con el proceso de Perforación del Pozo LV-6.

En este periodo podemos observar muy poca sismicidad registrada y una gran dispersión de los mismos en cuanto a la localización del pozo, con respecto de esta sismicidad registrada se consideran los eventos encerrados en el círculo rojo y verde, los cuales se encuentran en zonas cercanas a nuestros eventos de interés en el periodo 2, de los cuales se podrán correlacionar con los procesos realizados al pozo.

Para poder determinar si estos eventos corresponden a nuestro proceso de perforación se analizaron más a detalle, considerando la fecha en que fueron registrados.



# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

## ✓ Periodo B

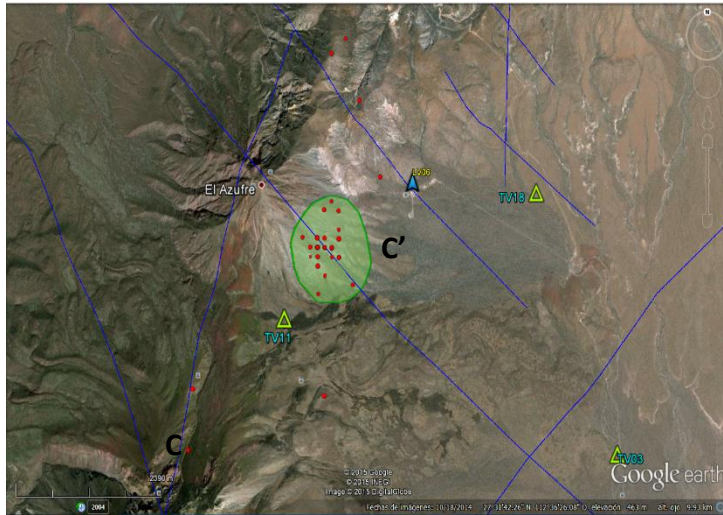
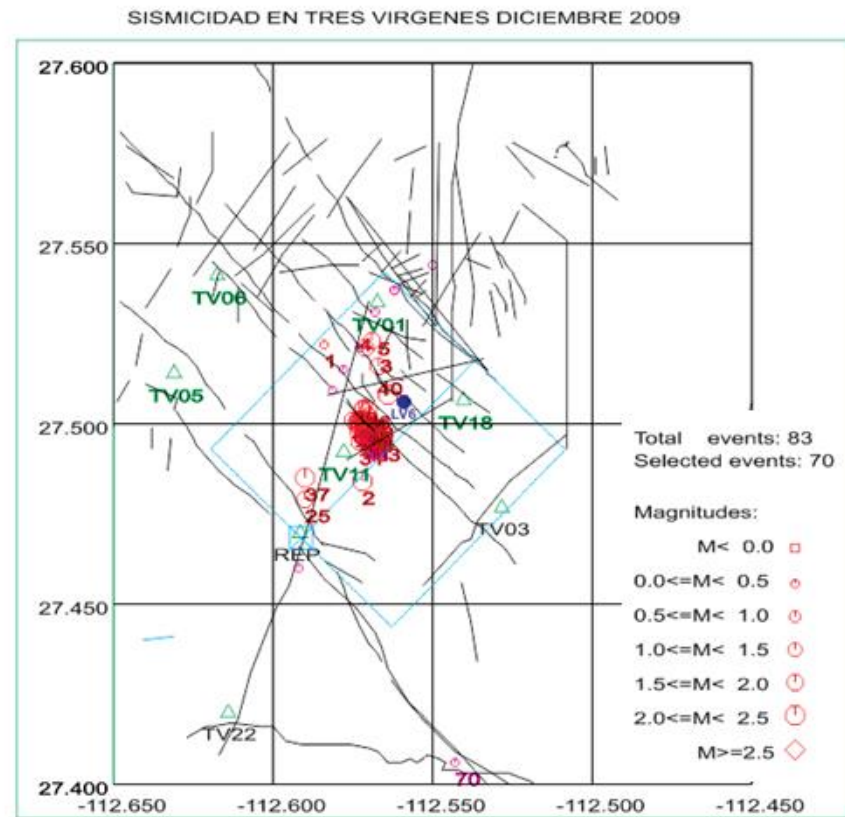


Figura 3.13 Eventos visualizados en epimap de la sismicidad durante de la estimulación ácida del pozo, en planta.



SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

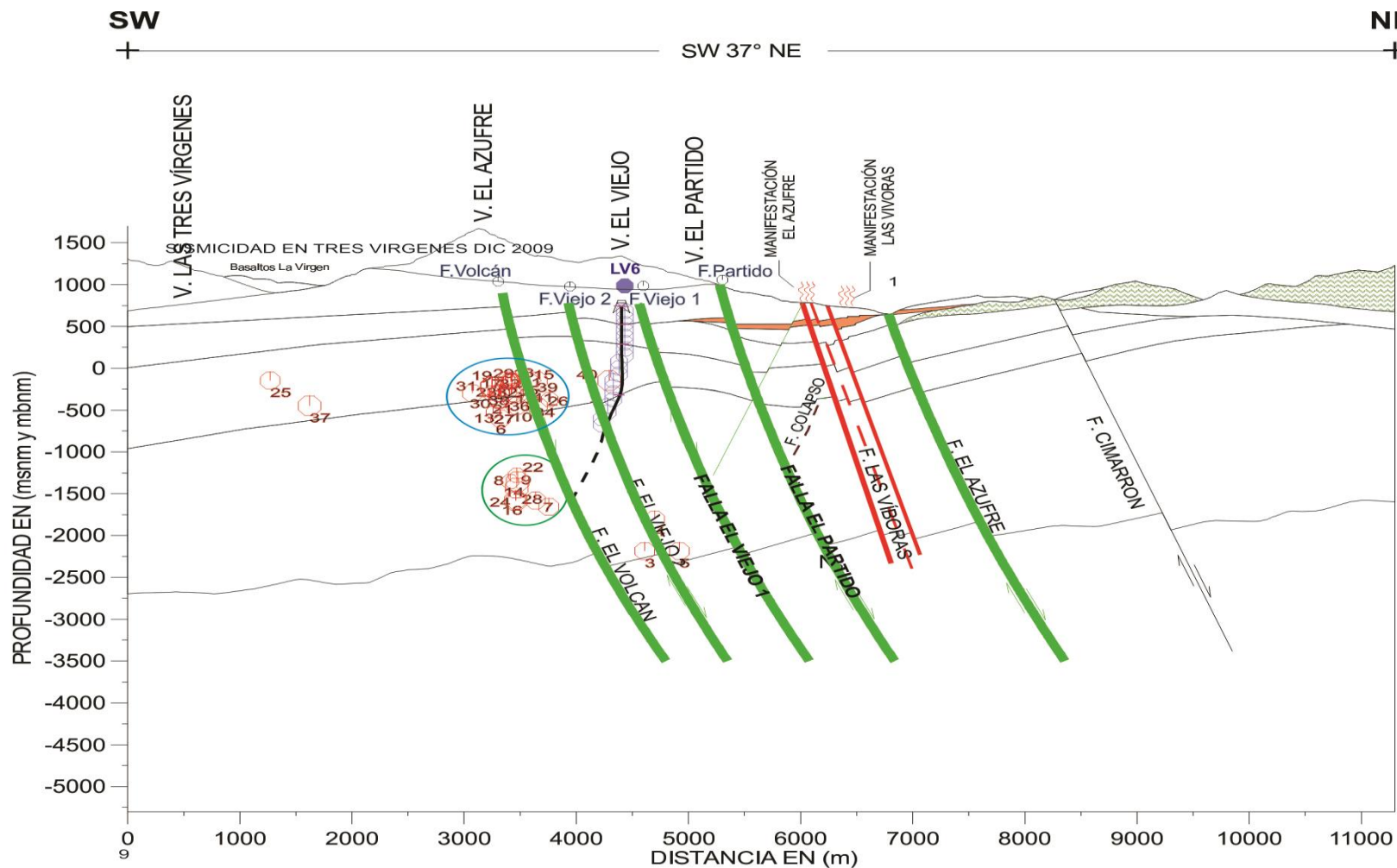


Figura 3.14 Eventos visualizados en epimapa de la sismicidad durante la estimulación ácida del pozo, en profundidad.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

Este se considera nuestro periodo de mayor interés ya que es en el cual existe el aumento más significativo en la sismicidad de acuerdo con nuestra estadística, debido a que en este mes se presentan varios procesos de la estimulación matricial del pozo LV6, comenzando con el último metro físico perforado el día 16 de diciembre del 2009 el cual se muestra en el círculo naranja, esos tres eventos se encuentran registrados en esta fecha. De acuerdo con los procesos del pozo LV-6, se asocia la mayor sismicidad los días 25 y 26 de diciembre los cuales se asocian al proceso de enfriamiento matricial del pozo el cual tuvo una duración de 24 hrs, con una inyección continua con gasto de 15 t/h incrementando gradualmente hasta llegar a un gasto de 130 t/h.

Como se puede ver en la imagen la mayoría de estos eventos sísmicos se encuentran localizados cerca de la Falla el Volcán, la cual se encuentra al SO del pozo LV-6 a una distancia aproximada de 1.2km en superficie.

En cuanto a su profundidad se muestra dentro de nuestra zona de estudio dos importantes acumulaciones de la sismicidad, de acorde a los procesos de la perforación y estimulación ácida del pozo LV-6, los primeros se asocian con el enfriamiento del pozo, el cual se realizó cuando la perforación del pozo finalizó, iniciando el 25 de diciembre y con una duración de 24:00 hrs en las cuales se realizó una inyección con gasto de 1tn/h incrementando hasta llegar a 130tn/h. En nuestro tercer acumulamiento de eventos localizados se encuentran tres eventos de gran importancia, estos eventos se relacionan con el último metro perforado, en la perforación física del pozo al encontrarse por debajo del pozo se pueden asociar con la perforación física, ya que durante la perforación también se encuentran eventos.

SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

✓ Periodo C

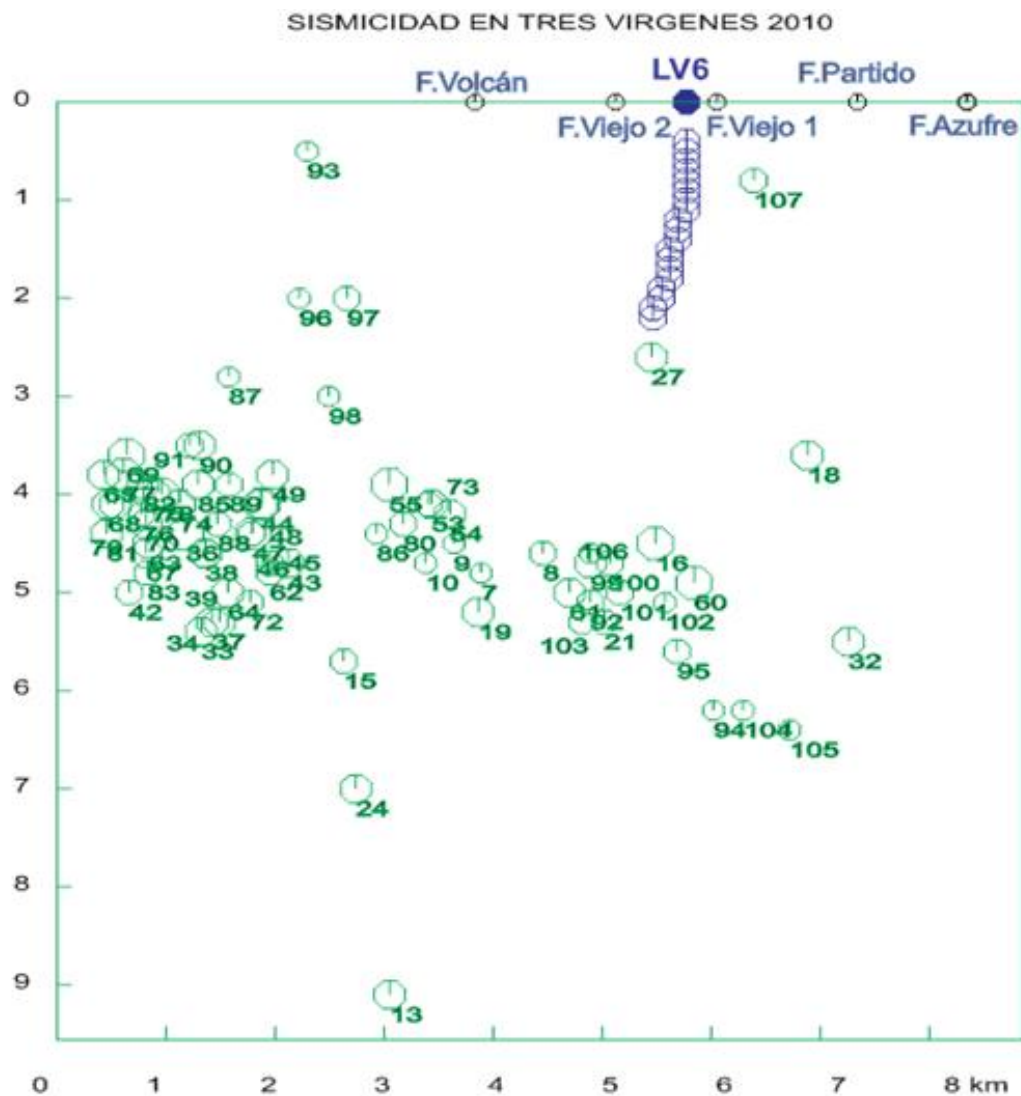
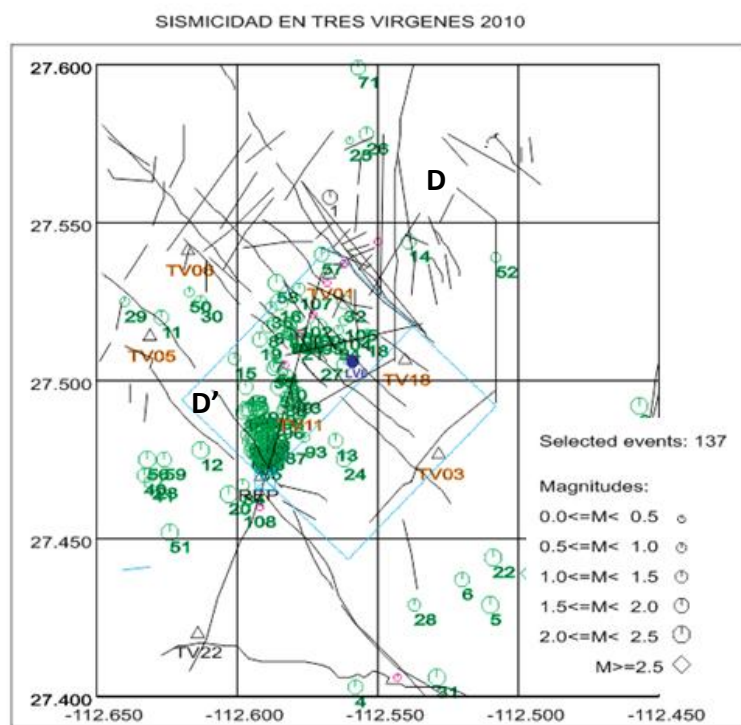


Figura 3.15 Eventos visualizados en epimap de la sismicidad después de la estimulación ácida del pozo, en planta y profundidad.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

En el tercer periodo se puede observar que existe un mayor número de eventos registrados aproximadamente entre la Falla La Virgen y la Falla el Volcán. A diferencia del periodo de estimulación matricial del pozo, la sismicidad se encuentra fuera de la zona de dicho proceso. En la imagen se puede percibir que la sismicidad cerca del pozo LV-6 se encuentra en dirección NW del mismo.

Esta escasez de eventos se puede deber a que al estar el pozo LV-6 direccionado hacia el SW y al mantener la producción constante, a partir del mes de marzo, el registro de la sismicidad va en dirección del pozo, por lo cual el incremento en la zona antes mencionada, al igual se muestran estos eventos con una mayor profundidad a comparación de los registrados anteriormente

En este periodo se puede visualizar los eventos registrados después del proceso de perforación y estimulación ácida del pozo LV-6, el cual se observa un aumento en la sismicidad y profundidad, estos se encuentran entre la Falla la Virgen y la Falla el Volcán.

## Capítulo 4 FORMAS DE ONDA Y ANÁLISIS ESPECTRAL

Del capítulo 3.1.1 seleccionaron 398 sismos locales registrados en el periodo de la perforación del pozo LV-6 de los 2021 sismos registrados, , que abarcan nuestra zona de estudio, de los cuales solo se pudieron localizar 41 eventos, por tal motivo se realizó un análisis de la forma de onda y análisis espectral de estos eventos, además de los eventos no localizados que contaban con poca señal de ruido y su componente Z en buena calidad para comprobar que estos eventos se asocian a dicho proceso.

Los sismos que se producen en las regiones volcánicas tienen una serie de características propias que los distinguen, tanto por su forma de onda y su duración como por su contenido espectral. Esto se debe, en parte, al mecanismo que los genera, en algunos casos muy distintos al de los sismos de origen tectónico y, en parte, a las peculiaridades del medio en el que se producen. Podemos clasificarlos según varios criterios, aunque lo más común es atender o bien a su forma de onda y contenido espectral, o bien al mecanismo de la fuente que los produce.

1. Forma de onda y su análisis espectral: este primer criterio es inmediato, basta echar un vistazo a los sismogramas y realizar un análisis preliminar, pero resulta arbitrario y poco general ya que los eventos difieren mucho de un volcán a otro. En nuestro caso si es de utilidad debido a que este análisis de forma de onda es para cerciorar que los eventos de menor tamaño estén asociados con los eventos que si se encuentran localizados, además de verificar que la localización sea lo más acertada posible.
2. Análisis de fuente: este criterio tiene más sentido físico y proporciona una visión unificadora de la actividad sísmica en los volcanes, aunque requiere un análisis más detallado que no siempre es posible.

De acuerdo con la selección de nuestros eventos generados por la estimulación ácida de pozo y a sus características, se realizó el análisis tanto de las formas de los eventos relacionados a este proceso, como su análisis de frecuencias, esto con motivo de relacionar si eventos de menor tamaño no localizados proceden del mismo origen. Además se realizó la comparación con eventos tectónicos volcánicos, de acuerdo con su forma de onda y análisis espectral de tal manera que podamos observar las diferencias entre dichos eventos, con los eventos inducidos a causa de la estimulación ácida del pozo LV-6.

### 4.1 Metodología

Para su mayor exactitud se utilizó el software Seismo volcanalysis (by François Auger, Olivier Lemoine, Paulo Gonçalves and Patrick Flandrin under the auspices of the CNRS), el cual nos ofrece herramientas fáciles de usar para llevar a cabo un análisis detallado de las señales sismo-volcánicas con una gran combinación de métodos. Se puede leer datos en diversos formatos comunes de

**SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO  
GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.**

obtenerse a través de la grabación continua o en modo de disparo. Se compone de varias interfaces interactivas que permiten seleccionar, filtrar, zoom, selección de secciones de registro, calcular estimaciones espectrales y representaciones tiempo-frecuencia, detectar eventos y registros correctos de respuesta del instrumento. En este caso se trabajó en formato seisán utilizando la componente Z de cada evento y obteniendo su forma de onda mostrando su diferencia entre S-P y su análisis espectral.

**4.2 Análisis De Formas De Onda Y Espectros De Frecuencia De Los Grupos A y B**

Para facilitar el manejo de toda la información en cuanto a sus formas de onda, considerando eventos previamente localizados con aquellos presentados secuencialmente, se realizaron las tablas 4.1 y 4.2 las cuales nos muestran las características de su forma de onda y análisis espectral de los eventos sísmicos localizados en la Figura 3.13 y 3.14. Con la finalidad de considerar los eventos más significativos de cada acumulación y mostrar detalladamente el análisis espectral y su forma de onda en relación a su diferencia S-P, de tal forma que se pueda relacionar con los eventos no localizados.

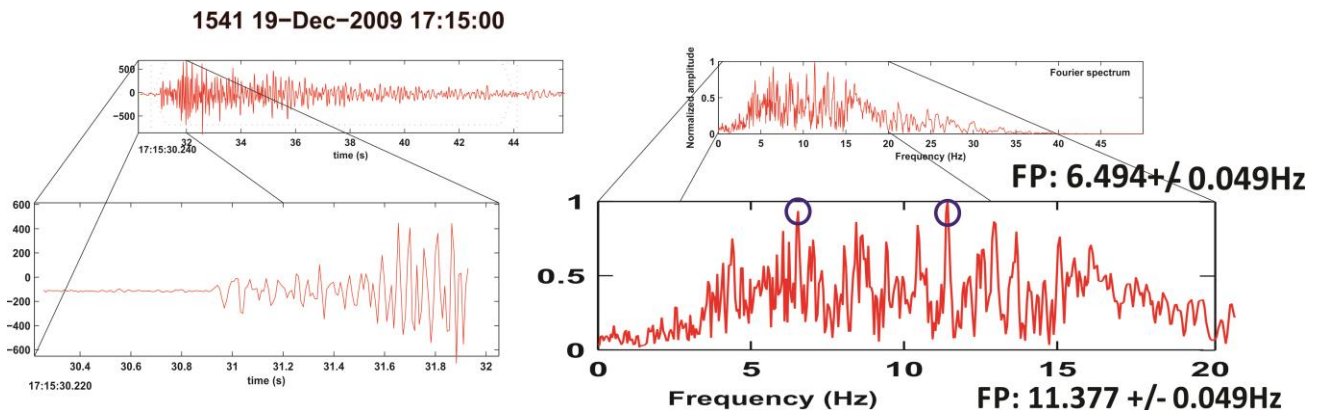
# EVEN.	FECHA DD/MM/AA	HORA HH:MM:SS	LATITUD (GRADOS)	LONGITUD (GRADOS)	PROF. (KM)	MC (GRADOS)	FRECUENCIAS PICO	
6	19/12/2009	17:15:52	27.501	-112.575	2.1	1.6	6.494	11.377
10	20/12/2009	01:05:09	27.5	-112.571	1.9	1.7	4.395	11.914
11	25/12/2009	11:13:33	27.501	-112.57	1.5	2.6	6.494	16.553
12	25/12/2009	11:27:56	27.5	-112.571	1.7	2.1	4.346	12.891
13	25/12/2009	12:01:15	27.499	-112.574	2	0.8	4.688	13.135
15	25/12/2009	12:45:28	27.504	-112.572	1.5	1.9	4.395	13.421
17	25/12/2009	13:01:12	27.5	-112.572	1.5	1.9	4.395	8.789
18	25/12/2009	13:55:56	27.5	-112.572	1.5	1.2	4.688	12.744
19	25/12/2009	14:26:44	27.498	-112.573	1.6	2.3	5.371	12.598
20	25/12/2009	14:32:55	27.5	-112.573	1.5	1.6	5.371	11.865
21	25/12/2009	15:34:29	27.499	-112.573	1.8	1.9	5.371	11.865
23	25/12/2009	16:21:58	27.5	-112.574	1.7	1.9	4.907	13.086
26	25/12/2009	23:51:59	27.505	-112.571	1.8	1.3	4.688	12.939
27	25/12/2009	23:53:34	27.5	-112.573	1.6	0.7	4.688	12.891
29	26/12/2009	06:00:55	27.5	-112.573	1.5	1.6	4.346	11.377
30	26/12/2009	06:08:12	27.497	-112.572	1.7	1.4	4.370	12.981
31	26/12/2009	06:09:57	27.495	-112.573	1.7	1.5	4.346	12.891
32	26/12/2009	07:02:39	27.5	-112.573	1.7	2.5	4.688	11.475
33	26/12/2009	07:03:58	27.496	-112.568	1.5	1.7	5.371	11.523
34	26/12/2009	07:56:53	27.504	-112.572	1.9	1.5	5.731	9.766
35	26/12/2009	10:12:32	27.501	-112.573	1.5	1.4	4.443	6.592
36	26/12/2009	10:44:36	27.5	-112.572	1.7	1.9	4.688	12.939
38	26/12/2009	22:34:28	27.501	-112.573	1.7	2	4.785	16.895
39	26/12/2009	22:35:22	27.501	-112.573	1.6	2.1	4.785	9.766
40	27/12/2009	15:10:35	27.508	-112.564	1.5	2	4.419	15.967

**SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.**

<b>41</b>	29/12/2009	14:59:51	27.496	-112.571	1.7	0.7	4.932	13.086
<b>PROMEDIO</b>							<b>4.892</b>	<b>12.358</b>
# EVEN.	FECHA DD/MM/AA	HORA HH:MM:SS	LATITUD (GRADOS)	LONGITUD (GRADOS)	PROF. (KM)	MC (GRADOS)	FRECUENCIAS PICO	
7	19/12/2009	17:17:03	27.504	-112.57	3.5	1.8	4.346	12.842
8	19/12/2009	17:18:49	27.499	-112.571	3.1	1.4	6.494	12.891
9	19/12/2009	21:35:53	27.501	-112.572	3.1	2	4.688	12.891
14	25/12/2009	12:33:10	27.5	-112.571	3.2	2	4.395	11.914
16	25/12/2009	12:56:23	27.499	-112.57	3.4	2	5.664	11.914
22	25/12/2009	16:10:59	27.5	-112.571	3	1.3	5.371	12.695
24	25/12/2009	16:34:16	27.499	-112.57	3.4	1.6	4.688	12.939
28	26/12/2009	01:37:05	27.502	-112.57	3.4	1.5	5.078	16.553
<b>PROMEDIO</b>							<b>5.090</b>	<b>13.079</b>

**Tabla 4-1 y 4-2** Corresponden a la acumulación de eventos sísmicos de la Figura.3.13 .A) y B). En la cual se muestra fecha, hora, longitud, latitud, magnitud y frecuencias significativas de cada evento sísmico.

De manera de poder visualizar la banda de frecuencias de mayor interés se realizó una ampliación (Figura 4.1), no solo en cuanto a su análisis espectral sino a su forma de onda, de esta manera se determina que en ambos grupos se presenta una forma de onda similar. En el análisis espectral se muestra una banda de frecuencias aproximadamente de 4 a 20 Hz, como se observa en la figura 4.2 y 4.3



**Figura 4.1** Ejemplo de ampliación de la forma de onda y el análisis espectral que se realizó en todos los eventos analizados.

Considerando el número de sismos registrados (398, solo para el mes de diciembre del 2009) en el proceso de estimulación ácida del pozo se realizó el análisis del espectro de frecuencias tanto a los eventos localizados de nuestro periodo 2, como aquellos que solo fueron registrados y que contaban con formas de onda lo más claras posibles, de los cuales solo pudieron analizarse 36 sismos, de manera, que dichos eventos pudieran ser relacionados con respecto de su origen, de acuerdo con el



## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

análisis dichos eventos no localizados (Figura 4.2), cuentan con las mismas características que los eventos localizados.

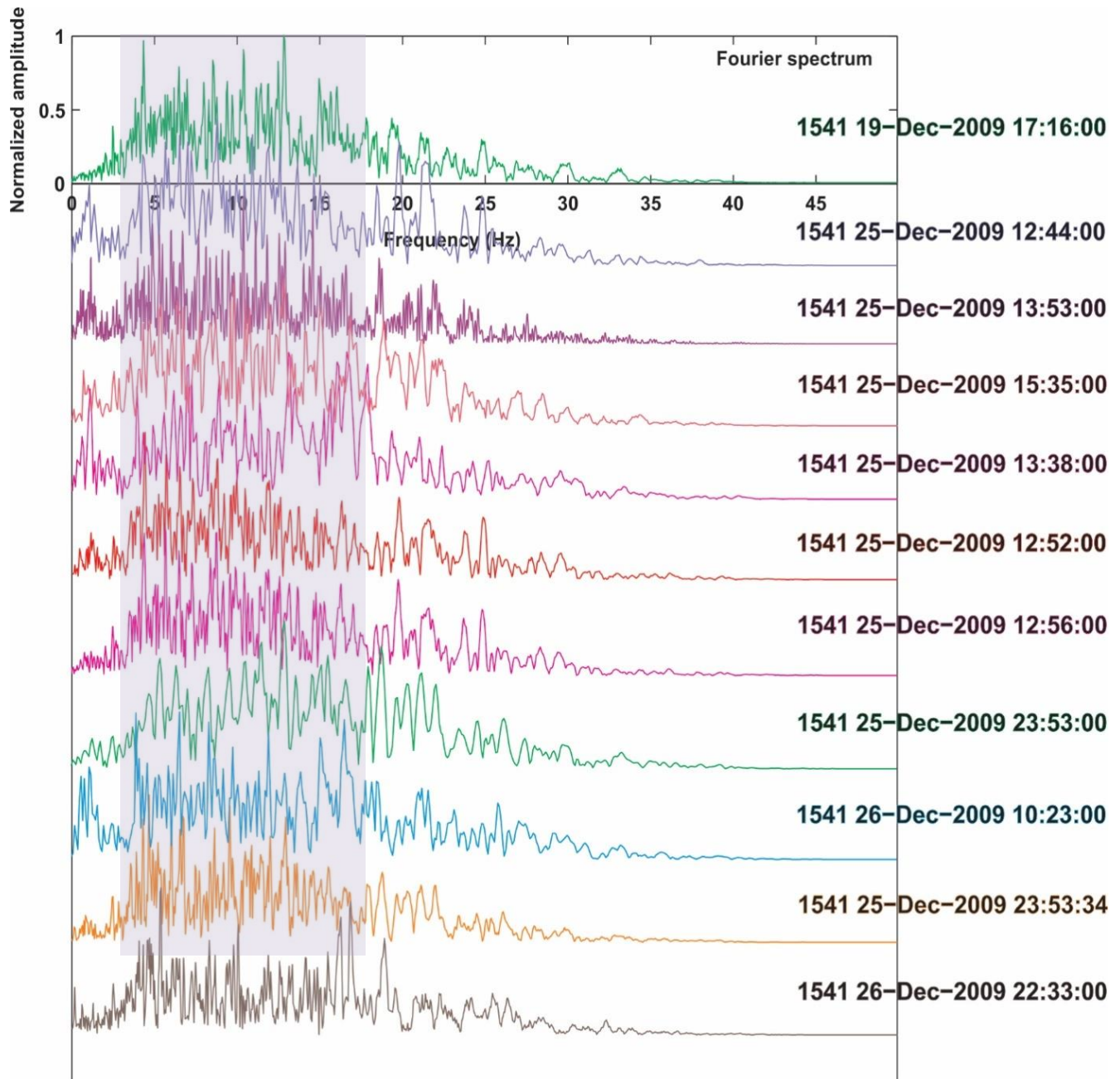


Figura 4.2 Muestra de los eventos no localizados seleccionados.

# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

## Grupo A

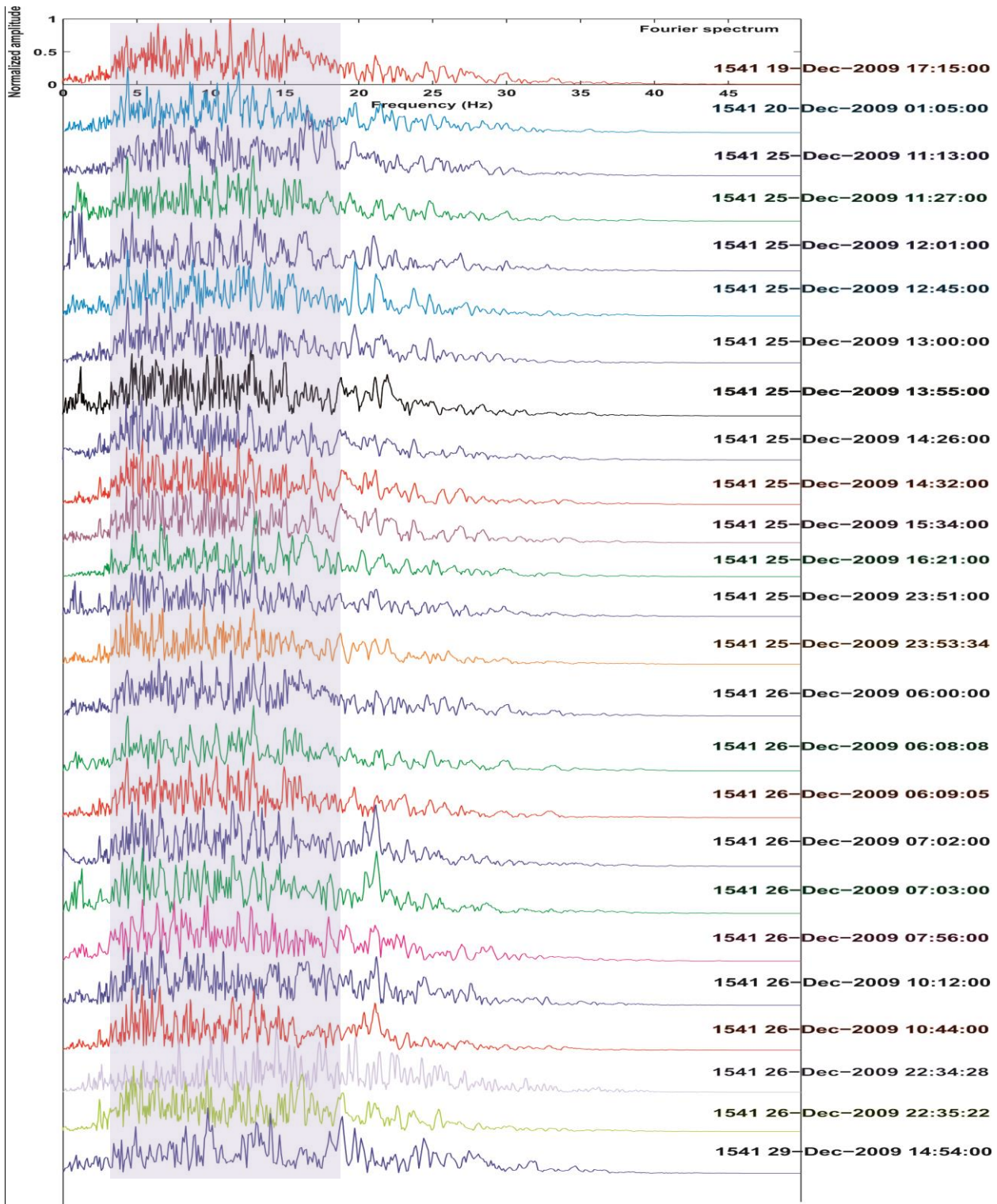
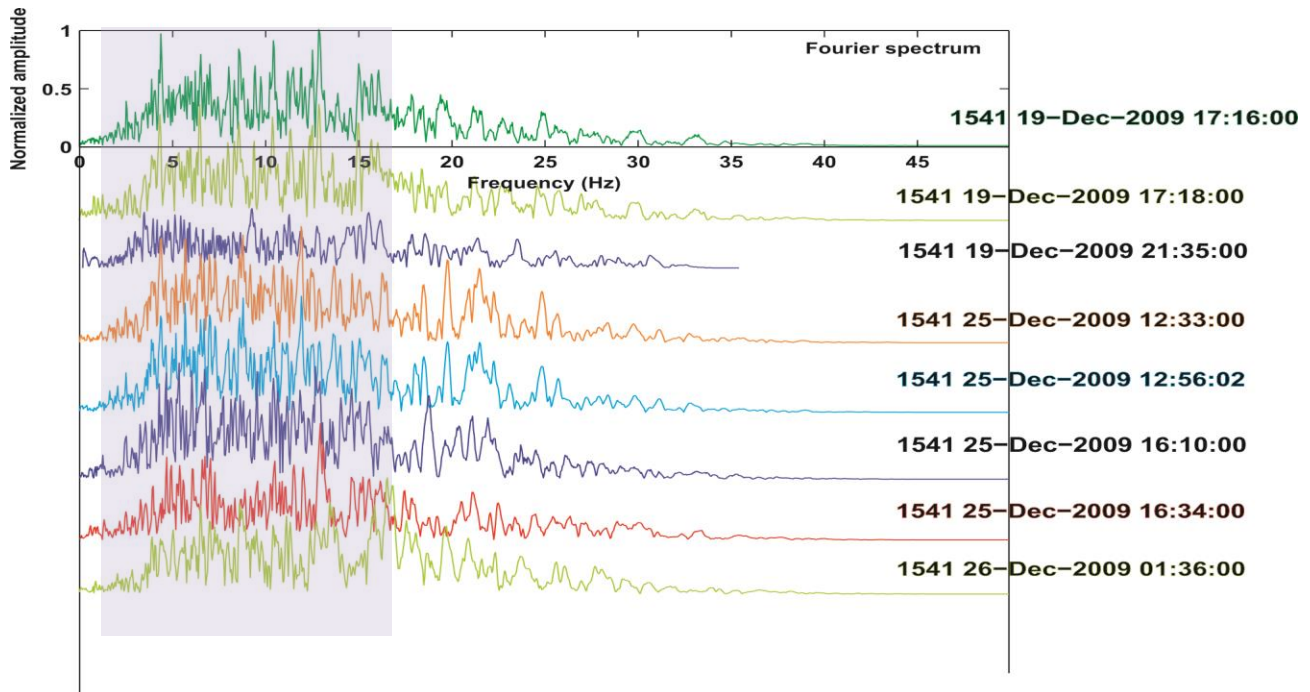


Figura 4.3 Muestra todos los análisis espectral de la tabla 4.1 a primera vista, obtenidos del programa Seismo volcanalysis, donde el cuadro representa la banda de frecuencias de interés.

**Grupo B**



**Figura 4.4** Muestra todos los análisis espectral de la tabla 4.2 a primera vista, obtenidos del programa Seismo volcanalysis, donde el cuadro representa la banda de frecuencias de interés.

Analizando la forma de onda de los eventos de ambos grupos se observa que estas cuentan con características similares, habiendo confirmado que estos eventos como los que no se localizaron se denota que tuvieron el mismo o un muy similar fracturamiento.

Sin embargo analizando las frecuencias pico más significativas se pudo representar de mejor manera un rango promedio de frecuencias en donde se presentan mayor energía, en el caso del grupo A nos muestra un rango de 4.892 a 12.358Hz y en el grupo B de 5.090 a 13.079Hz, de manera que para ambos caso no existe alguna diferencia significativa para separar los dos grupos.

También se pudo observar en algunos eventos una frecuencia entre 0 a 3Hz asociadas a posibles fuentes de ruido (tomado de Huanca J. *Origen, clasificación y análisis de las señales sismo-volcánicas*. Artículo del Observatorio Moquegua, Perú.).

La calidad de las señales sísmicas volcánicas registradas sobre un volcán puede verse afectada por otras vibraciones del suelo de poca energía que pueden ser consideradas como ruido. (Huanca J. *Origen, clasificación y análisis de las señales sismo-volcánicas*.)

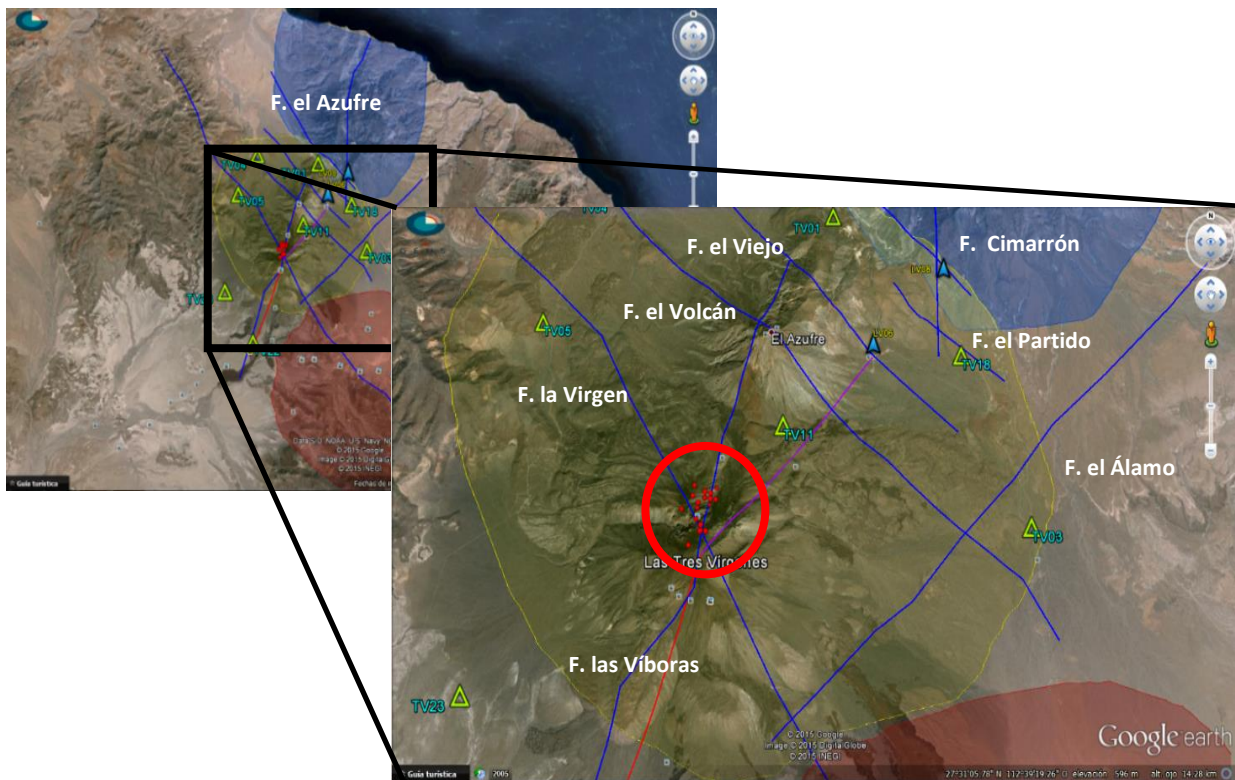
Las frecuencias menores de 0.5Hz están asociadas a condiciones meteorológicas (tormentas, depresiones barométricas, etc) y oceánicas (oleaje, acción de las mareas, etc.) que ocurren a gran escala. Estas señales están compuestas principalmente por ondas Rayleigh en modo fundamental (Moreno & Alfaro, 2000; Bonnefoy-Claudet, 2004).

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

Este análisis también se realizó a los eventos que no pudieron ser localizados, pero se encontraban registrados en la estación TV01 y que correspondían al periodo de enfriamiento del pozo, de manera que se pudo corroborar que cuentan con las mismas características en cuanto a su forma de onda y análisis espectral, de manera que se asociaron al mismo origen que el de los eventos previamente localizados.

### 4.3 Comparación Entre Eventos Inducidos En El Proceso De Inducción Ácida Y Eventos Tectónicos

Seguidamente se realizó una comparación de los eventos inducidos analizados anteriormente con eventos tectónico-volcánicos para poder identificar si presentan algún cambio o diferencia con respecto a los sismos inducidos. Estos 18 eventos se seleccionaron del año 2010; esto se debió que se quería contar con las mismas estaciones analizadas que se utilizaron en los eventos inducidos que se encuentran previamente localizados en el Volcán la Virgen, entre la falla las Víboras y la falla la Virgen. (Figura 4.5).



**Figura 4.5** Mapa que muestra los eventos tectónicos seleccionados de Abril a Agosto del año 2010, desde Google Earth, para su comparación con eventos inducidos.

**SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO  
GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.**

# EVEN	FECHA AA/MM/DD	HORA HH:MM	LATITUD (GRADOS)	LONGITUD (GRADOS)	PROF. (KM)	MC (GRADOS)	FRECUENCIAS PICO	
1	2010/04/23	18:49	27.475	-112.593	3.7	1.4	4.956	14.526
2	2010/04/23	22:40	27.479	-112.594	3.6	1.6	4.565	6.372
3	2010/04/24	10:17	27.481	-112.594	4.4	1.4	6.201	16.064
4	2010/05/02	10:17	27.481	-112.59	4.1	1.2	4.346	8.252
5	2010/05/02	10:18	27.48	-112.591	4	1.7	4.346	8.203
6	2010/05/02	10:36	27.478	-112.591	4.2	0.8	4.395	9.375
7	2010/05/02	18:36	27.474	-112.592	3.5	1.9	4.883	6.494
8	2010/05/02	18:37	27.479	-112.591	4	2.1	4.346	5.078
9	2010/05/03	01:55	27.477	-112.593	4.1	1.3	4.883	6.152
10	2010/05/05	07:36	27.479	-112.592	3.8	1.6	4.907	5.713
11	2010/06/15	18:25	27.473	-112.592	0.6	2.2	4.565	8.447
12	2010/07/11	22:16	27.473	-112.591	2	1.7	3.931	8.789
13	2010/07/16	23:08	27.471	-112.594	5.9	1.7	4.761	11.865
14	2010/07/20	10:32	27.479	-112.59	4.4	1.6	4.907	5.273
15	2010/07/28	06:54	27.478	-112.593	5.6	1.7	4.932	6.229
16	2010/08/01	01:27	27.479	-112.592	4.5	1.5	4.102	6.055
17	2010/08/16	08:52	27.477	-112.596	2	1.6	3.955	6.934
18	2010/08/21	05:49	27.48	-112.592	4	1.9	3.223	6.201
<b>PROMEDIO</b>							<b>4.566</b>	<b>8.112</b>

**Tabla 4-3** *Corresponde a la acumulación de eventos sísmicos de la Figura.4.3 En la cual se muestra fecha, hora, longitud, latitud, magnitud y frecuencias significativas de cada evento sísmico.*

En este caso se realizó el mismo procedimiento mencionado anteriormente para los eventos de los grupos A y B de manera que en la 4.6 se observan todos los análisis espectrales de los eventos mencionados en la tabla 4.3 en los cuales se puede observar cierta similitud en cuanto a los eventos analizados anteriormente.

Estos eventos también cuentan con una banda de frecuencias de 4 a 17Hz aproximadamente, sin embargo analizando las frecuencias pico más significativas se pudo representar de mejor manera un rango promedio de frecuencias en donde se presentan mayor amplitud, siendo de 4.566 a 8.112Hz , en este caso se puede notar un ligero cambio no solo en la banda de frecuencia, si no también respecto a su contenido con respecto a su amplitud, haciendo ver su análisis espectral ligeramente más chico, mostrándose un decaimiento de amplitud en aproximadamente 7Hz que no se muestra en el análisis de los eventos inducidos.

# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

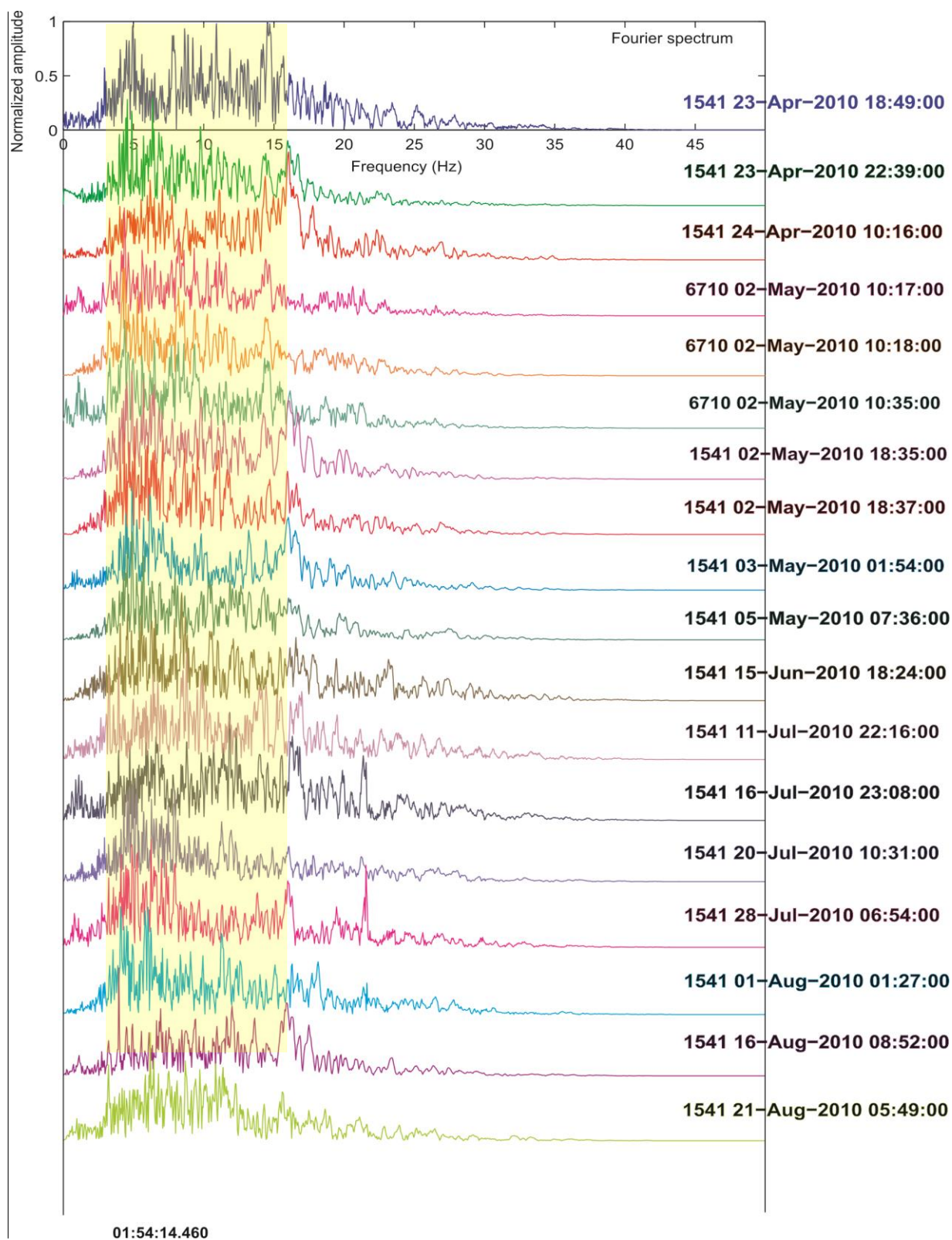


Figura 4.6 Análisis espectrales de los eventos tectónicos seleccionados.

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

Sobreponiendo un evento seleccionado de cada Grupo analizado, podemos observar que en las acumulaciones registradas en el año 2009 asociadas a nuestro proceso de estimulación del pozo LV-6 y los eventos tectónicos seleccionados del año 2010, muestra un análisis espectral muy similar, empezando con una frecuencia característica alrededor de los 4Hz y un decaimiento de amplitud alrededor de los 7Hz.

En la figura 4.7 se puede observar una ligera variación en la banda de frecuencia, los eventos inducidos muestran una banda de frecuencia de 4 a 20Hz aproximadamente y en los eventos tectónicos esta banda de frecuencias es de 4 a 17Hz, además de a partir de los 11Hz aproximado, un decaimiento considerable en su amplitud.

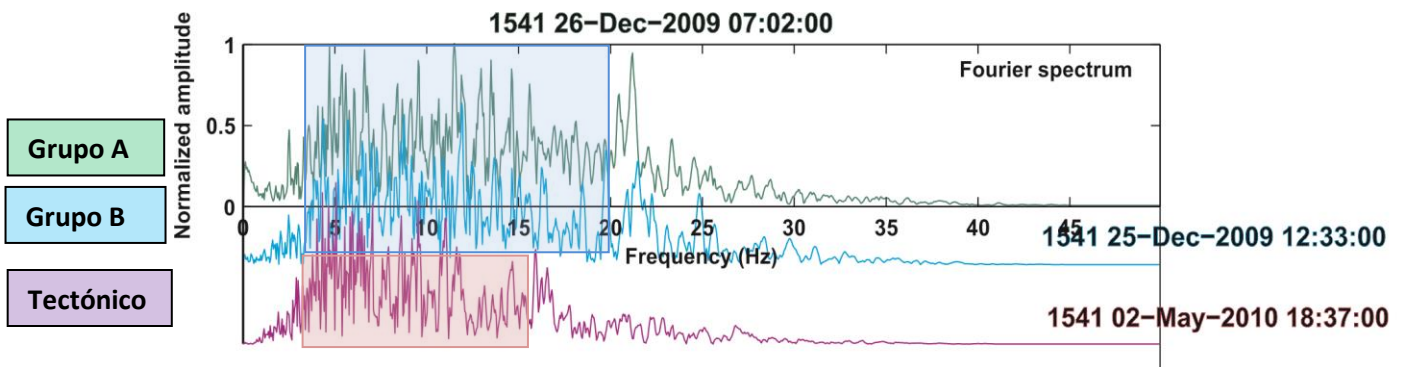


Figura 4.7 Análisis espectral tomando un evento significativo del grupo A, B y de los eventos tectónicos.

### 4.4 Parámetros De Fuente

El análisis espectral de las ondas sísmicas es uno de los métodos más utilizados para la determinación del tamaño del sismo y las dimensiones de la fractura. Esta técnica se basa en la dependencia del espectro de amplitudes con las dimensiones de la fuente sísmica.

Con la estimación de los parámetros de atenuación de la corteza, se estiman los parámetros de fuente de los sismos mejor registrados, modelando los espectros de desplazamiento del campo de estudio.

#### 4.4.1 Modelado De La Fuente.

El modelado de fuente utilizado es el modelo de Brune (1970), modificado por Havskov y Ottemoller (2015) y considerando la atenuación a altas frecuencias en la corteza ( $\kappa$  y  $Q$ ). Un resumen de los aspectos teóricos más relevantes y la explicación de la forma en que se llega al modelado teórico manejado en el presente estudio (Havskov y Ottemoller r, SEISAN 2015, pag. 144-151).

La ecuación de dicho anexo presenta el modelo de fuente sísmica utilizado:

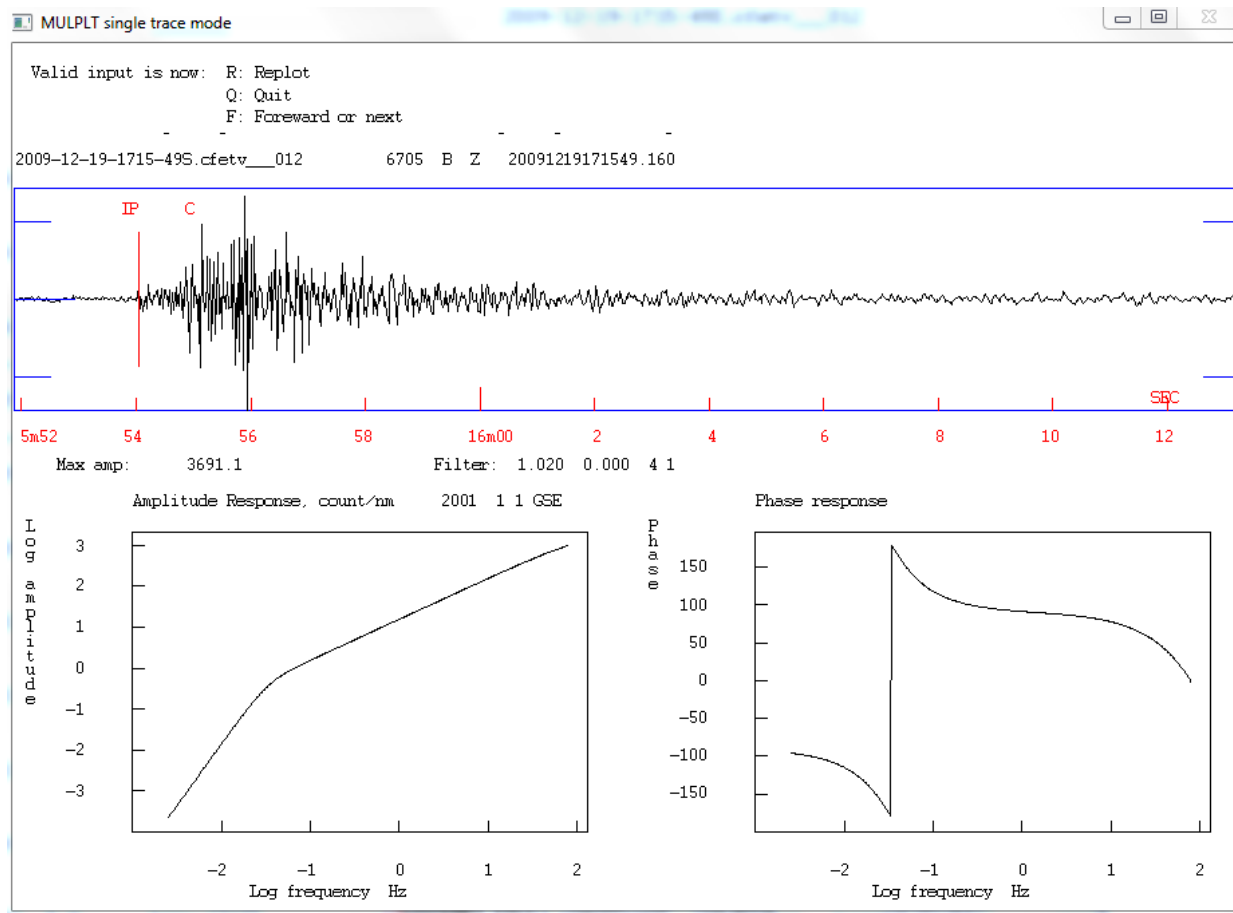
$$D(f, t) = \frac{2(0.6)M_o}{4\pi\rho v^3 \left(1 + \left[\frac{f}{f_o}\right]^2\right)} G(r) e^{-\pi f K} e^{\frac{\pi f t}{Q(f)}} \quad (1)$$

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

donde  $D(f,t)$  es el desplazamiento teórico en función de la frecuencia ( $f$ , en Hz) y el tiempo  $D(t, en s)$ ; 2 y 0.6 son factores que toman en cuenta el efecto de la superficie libre y el efecto promedio del patrón de radiación, respectivamente;  $M_0$  es el momento sísmico (Nm);  $G(r,h)$  la dispersión geométrica en función de la geodistancia ( $r$ , en Km);  $\rho$  es la densidad ( $Kg/m^3$ );  $v$  es la velocidad (m/s) de onda sísmica en la fuente (P o S dependiendo del espectro) y  $f_0$ , la frecuencia esquina. Se puede apreciar que el modelo ya incluye la atenuación en la corteza en las dos exponenciales en cuyos argumentos se encuentran los parámetros kappa y Q. El modelo considera además una dispersión geométrica de ondas de cuerpo, dado que se trata de sismos locales.

### 4.4.2 Aplicación Del Modelo.

Se calcularon todos los espectros de desplazamiento posibles a partir de los eventos asociados a nuestro proceso de estimulación del pozo LV-6 y a eventos tectónicos localizados en el volcán La Virgen, considerando aquellos que fueran viables, pues se requieren registros con una baja S/R, fases visibles y por lo menos muestrados a 100 mps para poder hacer un análisis espectral. Se calcularon registros de desplazamiento a partir de SEISAN, paquete con el cual fueron corregidos por la respuesta del instrumento (Figura 4.8) para luego ser integrados.



**Figura 4.8** Ejemplo del procedimiento en SEISAN para obtener registros en desplazamientos en el cual, primero se corrige la señal por la respuesta del instrumento.



## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

Para el análisis se usaron los paquetes de programas SEISAN 10.3 (Havskov et al. 2015), los cuales se basan en el modelo de Brune (Brune, 1970, Propuesto originalmente por Aki, 1969) y por lo tanto tienen un espectro de desplazamiento.

Antes de sacar los parámetros de las señales se realizó un ajuste en los parámetros del modelo espectral en MULPLT.DEF, de tal manera que se ajustara con la información del campo Geotérmico Tres Vírgenes, en el cual se estableció una velocidad de onda P de 3.47Km/s, la cual fue estimada de acuerdo al promedio del modelo de velocidades (Rodríguez et al. ,2000) considerando solo hasta una profundidad de 10km debido a que los eventos seleccionados no superan esta profundidad y para estimar el factor de  $Q_0$ , se utiliza el modelo de retrodispersión simple propuesto por Aki y Chouet (1975). De acuerdo al modelo, la envolvente de desplazamiento  $A(r,t)$  de las ondas de coda en una banda de frecuencias  $f$  puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\ln[t^2]Aobs[f(r, t)] = C - Q_0^{-1}2\pi ft \quad (2)$$

Dónde:  $C$  es una constante que depende de la frecuencia,  $Aobs[f(r, t)]$  es la amplitud media del registro,  $\ln$  es el logaritmo natural,  $t$  es el tiempo medido desde el tiempo origen del sismo y  $Q_0$  es el factor de calidad que contiene información de la atenuación de la energía sísmica.

Para estimar el factor de calidad ( $Q_c$ ) de la atenuación sísmica en el campo geotérmico de Tres Vírgenes, se ha utilizado los 423 sismos registrados y mejor localizados durante diciembre 2003 a diciembre del 2012. Obteniendo un valor de (factor de calidad)  $Q_0 = 29.0$  (Proporcionado por M. en C. Yanet Antayhua, Tesis en desarrollo, ecuación 2).

Una vez considerados los parámetros del campo geotérmico Tres Vírgenes y de acuerdo con el modelo descrito anteriormente, los parámetros útiles de un espectro son su parte plana y su frecuencia de esquina. Estos parámetros permiten calcular

- 1) El momento sísmico,
- 2) El radio de ruptura
- 3) La caída de esfuerzos.

- **Frecuencia esquina ( $f_0$ ):** Se define como la intersección de la parte plana y el decaimiento.
- **El momento sísmico ( $M_0$ ):** El momento es la mejor medida de la cantidad de energía liberada (indica el tamaño real del sismo). Este parámetro es el producto del coeficiente de rigidez del medio donde se produce el sismo, el área de la dislocación, y el desplazamiento medio de la misma. En la mayoría de los casos es difícil estimar las dimensiones de la falla, y el momento sísmico se determina a partir del espectro de las ondas sísmicas registradas. Más recientemente se utiliza el tensor momento sísmico  $M_{ij}$  cuyas componentes contienen toda la información sobre las características del foco del sismo. Basada en el momento sísmico deducido del espectro de las ondas sísmicas, se ha definido recientemente la magnitud espectral  $M_w$  (Kanamori, 1977)

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

Los parámetros espectrales se calculan utilizando las relaciones:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v^3 10^{OM}}{G(r, g) * 2(0.6)} \quad (3)$$

Donde  $v$  es la velocidad de onda sísmica de la fuente (P o S, si es espectro de P o S respectivamente) y OM es el nivel espectral de la atenuación corregido por el espectro de desplazamiento,  $2(0.6)$  es un factor que toma en cuenta el efecto de la superficie libre y el efecto promedio del patrón radiación y  $G(r, h)$  la dispersión geométrica en función de la geodistancia.

- **El radio de ruptura(R):** da una información sobre la extensión de la ruptura asumiendo que el área de ésta tiene forma circular.

$$R = 0.37 \frac{v}{f_0} \quad (4)$$

Donde  $v$  es la velocidad de la onda P o S según sea el caso y  $f_0$  la frecuencia esquina.

- **La caída de esfuerzos (ST):** es la diferencia entre los esfuerzos antes y después de ocurrido el sismo o evento.

$$ST = 0.44 \frac{M_0}{R^3} \quad (5)$$

Donde  $M_0$  es el momento sísmico y  $R$  el radio de ruptura.

- **Magnitud de momento (Mw):** La cantidad de energía liberada por un sismo a partir del Momento Sísmico (Kamamori, 1977). Para su determinación se utiliza la siguiente expresión:

$$M_w = \frac{2}{3} * \log_{10} M_0 - 6.06 \quad (6)$$

Los parámetros que influyen el cálculo son la velocidad de la onda S en el hipocentro que a la vez depende del modelo de capas válido para el área epicentral. Además se tiene que conocer la ley de atenuación de las ondas sísmicas en el área de investigación.

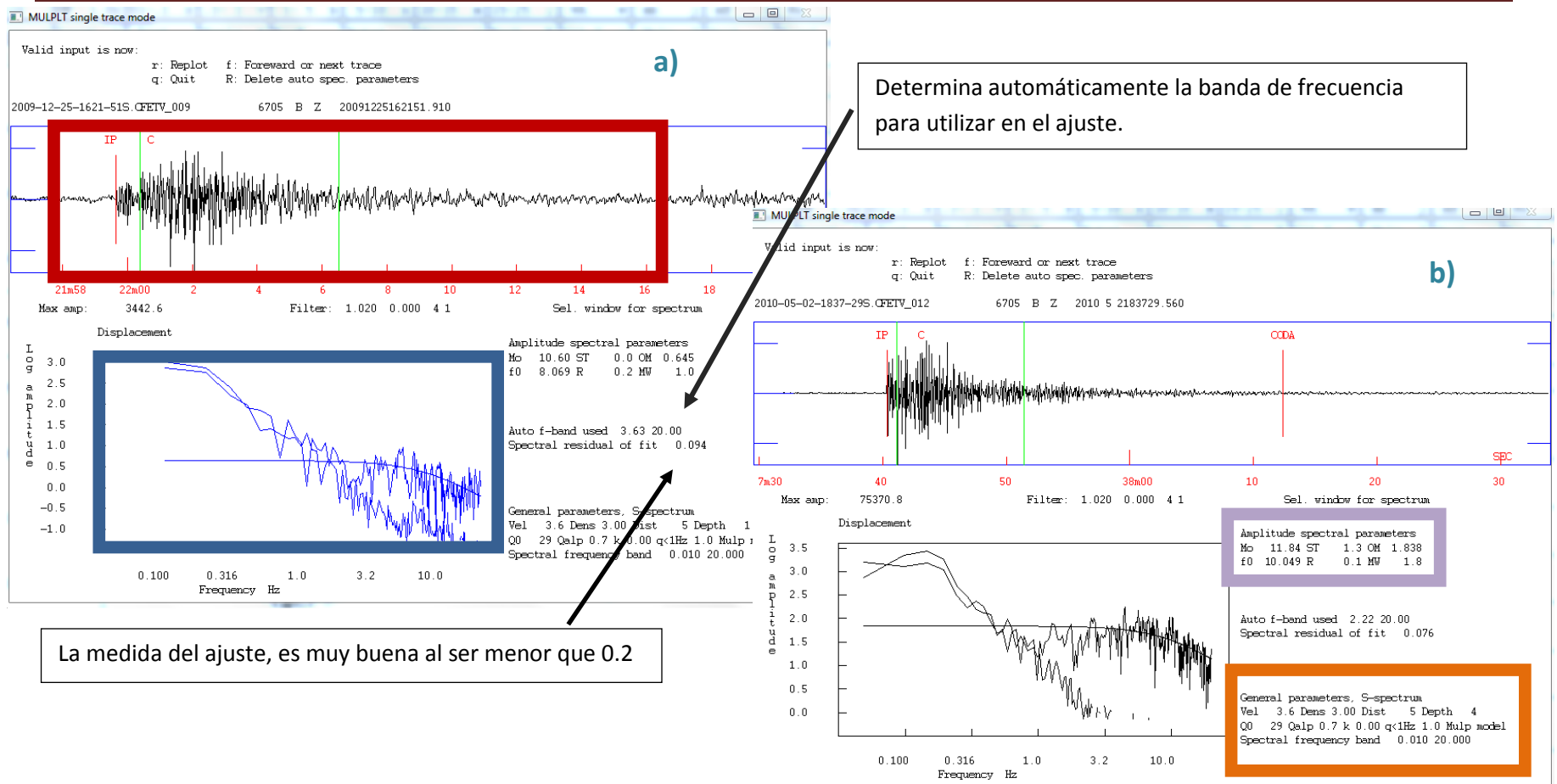
Para ello es conveniente representar en un gráfico bilogarítmico la amplitud espectral de las ondas frente a la frecuencia. Previamente se han debido corregir las señales por la respuesta instrumental, el patrón de radiación y todos los factores que afectan a la propagación de las ondas.

#### 4.4.3 Parámetros De Fuente Obtenidos

Con relación a la comparación en cuanto a la forma de onda y análisis espectral y a la poca diferencia entre los mismos, se determinaron los parámetros de fuente de los eventos asociados a la estimulación del pozo LV-6 (Figura-3.13) y a eventos tectónicos localizados en el Volcán La Virgen del año 2010 (Figura 4.5), que contaran con las mismas estaciones que los eventos inducidos para una mejor correlación entre ambos tipo de eventos y de esta misma manera poder visualizar de manera más detallada, en si existe algún cambio entre los mismos. Las estaciones que se utilizaron para los parámetros de fuente fueron la estación TV01 (1541) y la estación TV05 (6705), En el desarrolló del análisis se consideraron tanto el paquete de ondas P así como el paquete de ondas S, de tal forma poder observar cuál nos arrojaba un mejor resultado en cuanto la información obtenida.

Se seleccionó el paquete de onda S y la estación TV05 (6705) debido a que contenía una menor dispersión en su comparación entre los mismos grupos

# SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.



**Figura 4.9** Ejemplo del resultado arrojado por SEISAN para el cálculo de los parámetros de fuente mediante la selección de paquete de ondas S.

En la figura 4.9 se muestra la forma de onda (cuadro rojo), la forma de onda con respecto a su desplazamiento (cuadro azul), los parámetros de fuente obtenidos (cuadro amarillo) y los parámetros usados para el análisis espectral (cuadro verde), y a) Muestra un ejemplo de los eventos inducidos de la estimulación del pozo LV-6 correspondiente al día 25/12/2009 a las 16:21hrs, b) Muestra un ejemplo de los eventos tectónicos seleccionados correspondiente al día 02/05/2010 a las 18:37hrs.

**SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.**

Primeramente se obtuvieron los parámetros de fuente de los eventos seleccionados en la figura 3.13 del capítulo anterior, los cual se muestran en la siguiente tabla.

#	FECHA (DD/MM/AA)	HORA (HH:MM:SS)	PROF. (Km)	LOG(M <sub>0</sub> ) (N*m)	ST (bar)	F <sub>0</sub> (Hz)	R (Km)	OM (nm-s)	M <sub>w</sub>
6	19/12/2009	17:15:52	2.1	10.62	0.029	7.188	0.1853	0.672	1
10	20/12/2009	01:05:09	1.9	10.42	0.041	9.418	0.1414	0.45	0.9
11	25/12/2009	11:13:33	1.5	10.76	0.016	5.332	0.2503	0.788	1.1
12	25/12/2009	11:27:56	1.7	10.13	0.019	9.151	0.1456	0.167	0.7
13	25/12/2009	12:01:15	2	-----	-----	-----	-----		
15	25/12/2009	12:45:28	1.5	10.42	0.009	5.587	0.2384	0.471	0.9
17	25/12/2009	13:01:12	1.5	10.45	0.064	10.45	0.125	0.495	0.9
18	25/12/2009	13:55:56	1.5	9.82	0.006	7.983	0.1669	-0.141	0.5
19	25/12/2009	14:26:44	1.6	11.01	0.067	7.047	0.189	1.053	1.3
20	25/12/2009	14:32:55	1.5	10.59	0.038	8.073	0.165	0.634	1
21	25/12/2009	15:34:29	1.8	10.34	0.019	7.826	0.1702	0.375	0.8
23	25/12/2009	16:21:58	1.7	10.6	0.039	8.069	0.1651	0.645	1
26	25/12/2009	23:51:59	1.8	9.84	0.011	9.361	0.1423	-0.124	0.5
27	25/12/2009	23:53:34	1.6	10.22	0.008	6.466	0.206	0.272	0.8
29	26/12/2009	06:00:55	1.5	10.44	0.019	7.174	0.1857	0.488	0.9
30	26/12/2009	06:08:12	1.7	10.11	0.016	8.689	0.1533	0.144	0.7
31	26/12/2009	06:09:57	1.7	10.58	0.068	9.869	0.135	0.615	1
32	26/12/2009	07:02:39	1.7	10.87	0.116	9.45	0.1409	0.909	1.2
33	26/12/2009	07:03:58	1.5	9.73	0.016	11.693	0.1139	-0.262	0.4
34	26/12/2009	07:56:53	1.9	9.94	0.014	9.46	0.1408	-0.23	0.6
35	26/12/2009	10:12:32	1.5	9.99	0.022	10.666	0.1249	0.038	0.6
36	26/12/2009	10:44:36	1.7	10.61	0.011	5.304	0.2511	0.647	1
38	26/12/2009	22:34:28	1.7	10.22	0.022	9.001	0.148	0.263	0.8
39	26/12/2009	22:35:22	1.6	10.72	0.069	8.937	0.149	0.767	1.1
40	27/12/2009	15:10:35	1.5	9.64	0.039	16.891	0.0789	-0.358	0.4
41	29/12/2009	14:59:51	1.7	10.44	0.019	7.21	0.1847	0.467	0.9

**Tabla 4-4** Parámetros de fuente de los eventos inducidos asociados a la estimulación del pozo LV-6.  
 Simbología: Prof., profundidad en Km; M<sub>0</sub>, momento sísmico en Nm; ST, caída de esfuerzo en bar; f<sub>0</sub>, frecuencia esquina en Hz; R el radio de fractura en Km; OM nivel espectral plano en nm-s (nanómetro-segundo) y M<sub>w</sub>, magnitud de momento sísmico.

**SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.**

#	FECHA (AA/MM/DD)	HORA (HH:MM)	PROF. (Km)	LOG(M <sub>0</sub> ) (N*m)	ST (bar)	F <sub>0</sub> (Hz)	R (Km)	OM (nm-s)	M <sub>w</sub>
1	2010/04/23	18:49	3.7	10.56	0.251	15.439	0.0863	0.563	1
2	2010/04/23	22:40	3.6	11.69	0.301	6.904	0.1929	1.716	1.7
3	2010/04/24	10:17	4.3	11.02	0.189	9.919	0.1343	1.023	1.3
4	2010/05/02	10:17	4.1	10.73	0.088	9.576	0.1391	0.729	1.1
5	2010/05/02	10:18	4	11.83	2.1	11.822	0.1127	1.834	1.8
6	2010/05/02	10:36	4.2	10.51	0.054	9.663	0.1379	0.498	0.9
7	2010/05/02	18:36	3.5	11.43	0.408	9.332	0.1429	1.436	1.6
8	2010/05/02	18:37	4	11.84	1.3	10.049	0.1325	1.838	1.8
9	2010/05/03	01:55	4.1	10.74	0.166	11.773	0.1131	0.733	1.1
10	2010/05/05	07:36	3.9	11.04	0.113	8.224	0.162	1.047	1.3
11	2010/06/15	18:25	2	11.29	0.742	12.682	0.105	1.35	1.5
12	2010/07/11	22:16	2	10.99	0.045	6.275	0.2123	1.019	1.3
13	2010/07/16	23:08	5.9	10.65	0.081	9.909	0.1344	0.563	1
14	2010/07/20	10:32	4.5	10.53	0.045	8.908	0.1495	0.45	1
15	2010/07/28	06:54	5.6	11	0.049	6.431	0.2071	0.9	1.3
16	2010/08/01	01:27	4.4	11.36	0.219	8.033	0.1658	1.343	1.5
17	2010/08/16	08:52	2	10.82	0.038	6.713	0.1984	0.816	1.2
18	2010/08/21	05:49	4	10.95	0.136	9.322	0.1429	0.913	1.2

**Tabla 4-5** *Parámetros de fuente de los tectónicos seleccionados (Figura 4.4.1). Simbología: Prof., profundidad en Km; Mo, momento sísmico en Nm; ST, caída de esfuerzo en bar; f<sub>0</sub>, frecuencia esquina en Hz; R el radio de fractura en Km; OM nivel espectral plano en nm-s y Mw, magnitud de momento sísmico.*

Una vez obtenidos los parámetros de fuente (tabla 4.5) se realizó una comparación en relación de: su momento sísmico Vs la caída de esfuerzos, Momento sísmico Vs frecuencia esquina, momento sísmico Vs radio de ruptura y magnitud de momento con profundidad. De esta forma poder visualizar si existe alguna diferencia significativa entre estos tipos de eventos en el Campo Geotérmico Tres Vírgenes.

En la figura 4.10 analizamos las variaciones de caída de esfuerzos Vs Momento sísmico, en donde se puede observar la diferencia entre los eventos inducidos asociados al enfriamiento del pozo LV-6 (círculos azules) con eventos tectónicos seleccionados dentro del mismo campo Geotérmico (círculos rojos), donde se puede asumir que los eventos inducidos se encuentran en un rango menor que los eventos tectónicos en cuanto su caída de esfuerzo (St) y su momento sísmico (Mo).

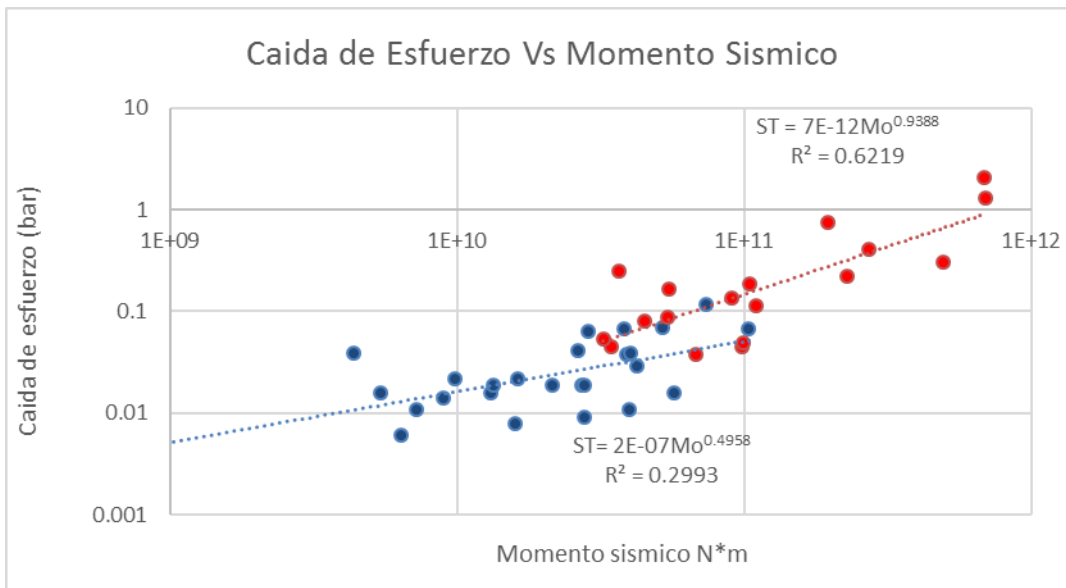
## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

En los primeros se observa un momento sísmico de  $4.4E09$  hasta  $1E11N*m$  y una caída de esfuerzo de  $0.006$  hasta  $0.116$  bar, y los eventos tectónicos se observa un momento sísmico de  $3.2E10$  hasta  $6.9E11 N*m$  y una caída de esfuerzo de  $0.038$  hasta  $2.1$  bar. De manera que muestra que los eventos inducidos tienen un menor valor en cuanto a su momento y su caída de esfuerzos.

Se presenta también la mejor línea que ajusto la tendencia observada, en la cual se observa que la caída de esfuerzo aumenta con respecto al momento sísmico, con un valor de correlación cuadrado ( $R^2$ ) de  $0.2993$  para eventos inducidos y de  $0.6219$  para los eventos tectónicos.

$$ST = 2E-07M_o^{0.4958} \dots\dots\dots (a) \quad ST = 7E-12M_o^{0.9388} \dots\dots\dots (b)$$

Ecuaciones de la línea de tendencia con respecto a la caída de esfuerzos y el momento sísmico, (a) inducido y (b) tectónico.



**Figura 4.10** Correlación entre el momento sísmico ( $M_o$ ) y la caída de esfuerzo ( $ST$ ) de la acumulación A (Azules) y los eventos tectónicos (Rojos) seleccionados.

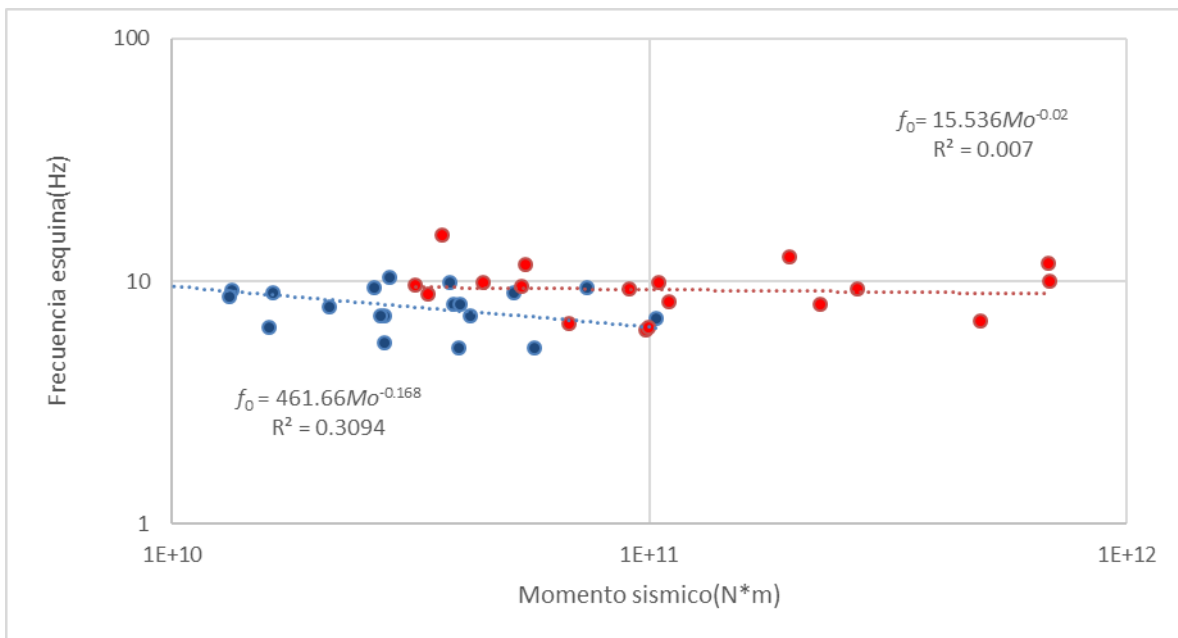
## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

En la figura 4.11, Se observa la variación de la frecuencia esquina Vs Momento sísmico. En este caso se puede observar un aumento con respecto al momento sísmico, para el caso de los eventos inducidos (círculos azules) y los eventos tectónicos (círculos rojos), como se puede observar los eventos inducidos disminuyen con respecto al momento sísmico y en el caso de los eventos inducidos la frecuencia esquina presenta valores casi constantes con respecto al mismo.

Se presenta también la línea de tendencia observada, que mejor ajuste, en la cual se observa que la frecuencia esquina disminuye con respecto al momento sísmico para los eventos inducidos, con un valor de correlación cuadrado ( $R^2$ ) de 0.3094 y para eventos tectónicos de 0.007, la cual sigue una línea de tendencia casi constante.

$$f_0 = 461.66M_0^{-0.168} \dots\dots\dots (a) \quad f_0 = 15.536M_0^{-0.02} \dots\dots\dots (b)$$

Ecuaciones de la línea de tendencia con respecto a la frecuencia esquina ( $f_0$ ) y el momento sísmico ( $M_0$ ), (a) inducido y (b) tectónico.



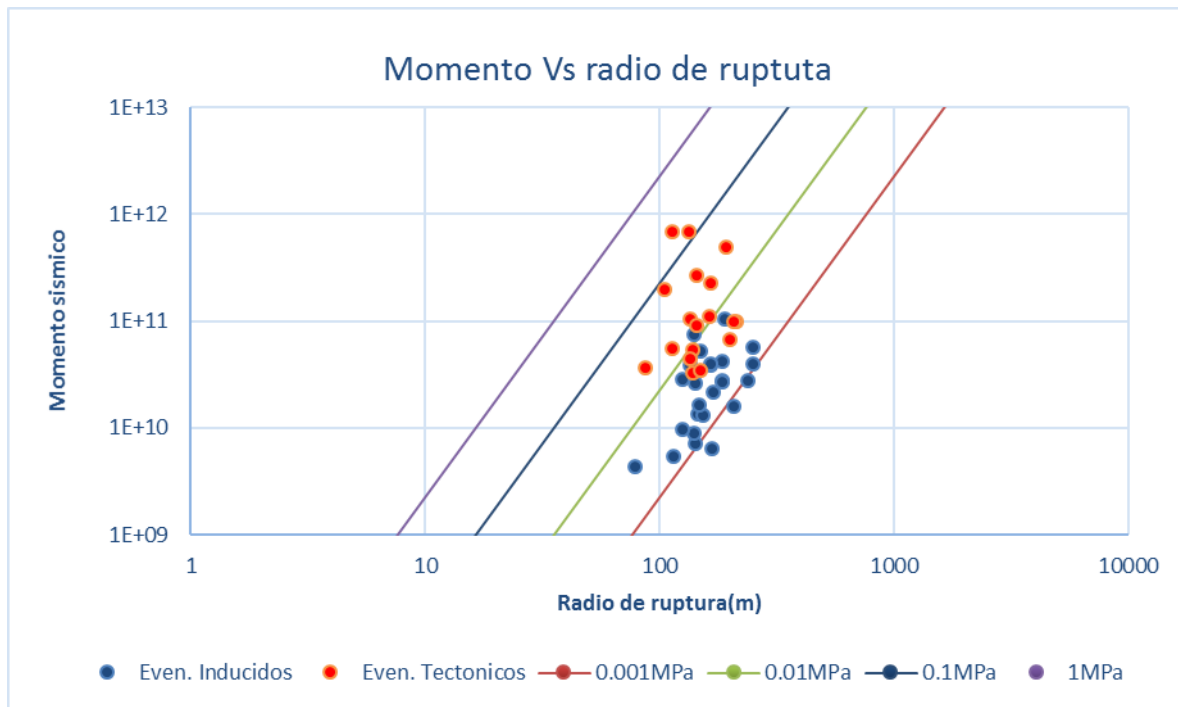
**Figura 4.11** Correlación entre frecuencia esquina ( $f_0$ ) y momento sísmico ( $M_0$ ) de los eventos inducidos (Azules) y los eventos tectónicos (Rojos) seleccionados.



## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

En la figura 4.12, se puede observar la variación del radio de ruptura con respecto al momento sísmico, además sobreponer valores de caída de esfuerzos constantes que van de 0.001 MPa a 1MPa, los eventos inducidos (azules) se presentan en un rango menor en cuanto a su caída de esfuerzo de entre 0.001 y 0.1 MPa y los eventos inducidos (rojos) cuentan con una ST de 0.01 0.1 MPa.

En ambos casos se puede observar que cuentan con radio de ruptura dentro del mismo rango de aproximadamente 80 a 200 m y variación en su momento sísmico.



**Figura 4.12** Correlación entre Momento sísmico ( $M_0$ ), radio de ruptura ( $R$ ) y caídas de esfuerzo constantes de los eventos inducidos (Azules) y los eventos tectónicos (Rojos) seleccionados.

Finalmente en la figura 4.13 se comparan la magnitud de momento ( $M_w$ ) VS su profundidad (Prof), ambos eventos tanto inducidos (círculos azules) como los tectónicos (círculos rojos). Como podemos apreciar las magnitudes de momento presenta valores similares, sin embargo los eventos tectónicos se encuentran a una profundidad mayor.

SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

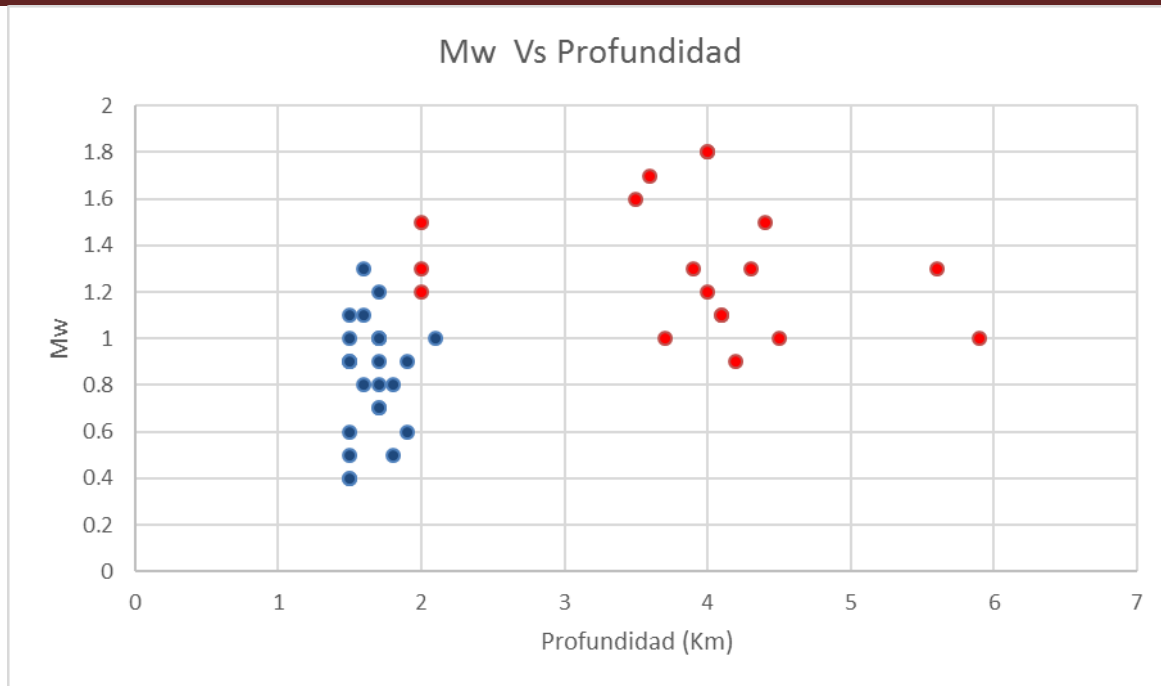


Figura 4.13 Correlación entre Magnitud ( $M_w$ ) y profundidad de los eventos inducidos (Azules) y los eventos tectónicos (Rojos) seleccionados.

Del análisis de los datos procesados se obtuvieron momentos sísmicos que varían entre  $M_0 = 4.4 \times 10^9$  y  $M_0 = 1 \times 10^{11}$  Newton-m, para magnitudes  $0.4 \leq M_w \leq 1.5$ , mientras que las estimaciones de las caídas de esfuerzos y los radios de la fuente van de 0.006 a 0.146 barios y de 75 a 250 metros, respectivamente, para eventos inducidos. Del análisis de los datos procesados para eventos tectónicos se obtuvieron momentos sísmicos que varían entre  $M_0 = 3.2 \times 10^{10}$  y  $M_0 = 6.9 \times 10^{12}$  Newton-m, para magnitudes  $0.8 \leq M_w \leq 1.8$ , mientras que las estimaciones de las caídas de esfuerzos y los radios de la fuente van de 0.038 a 2.1 barios y de 80 a 215 metros, respectivamente.

En resumen, comparando las relaciones antes vistas en las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 podemos observar los siguientes cambios entre los eventos inducidos y los eventos tectónicos.

PARÁMETRO	INDUCIDOS	TECTÓNICOS
$M_0$	4.4E09---1E11	3.2E10---6.9E12
$ST$	0.006---0.146 bar	0.038---2.1 bar
$F_0$	4---12 Hz	6---14 Hz
$R$	75---250 m	80---215 m
$M_w$	0.4---1.4	0.8---1.8
$PROF.$	1---2 km	2---6km

## Capítulo 5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Para conocer el aumento de la sismicidad en el campo Geotérmico Tres vírgenes en cuanto al periodo en que se realizó el proceso de Perforación y estimulación ácida del pozo, se efectuó una estadística que inicio el día 16 septiembre del 2009, comenzando en esta fecha hasta finales de diciembre. A partir de esto se logró relacionar cada proceso de acorde a la sismicidad registrada, dejando como principal proceso el enfriamiento del pozo LV-6, esto debido al cambio de temperatura, por aproximadamente 24hrs, llegando a la siguiente conclusión:

1. Esta sismicidad fue INDUCIDA, debido a su distribución espacial y profundidad (mostrado en la Figura 3.13 Y 3.14) y a su correlación con los procesos de estimulación del pozo. (mostrado en las Figuras 3.9 y 3.10)
2. Esta sismicidad tiene un azimut de 231° con dirección al SW con respecto al pozo, abarcando un área aproximada de 919.5m<sup>2</sup> y a una distancia aproximada de 1.5km del mismo, esta a su vez se encuentran localizada sobre el sistema de fallas, sobre la falla el volcán a una profundidad de entre los 1.5 y 2.5km.

No obstante al ser un número considerable los eventos que no fueron localizados por su magnitud pequeña ( $M_w > 0.5$ ) y que se presentan en solo una o dos estaciones de la red sísmica. De los 357 eventos no localizados, se tomaron 36 sismos que contaban con la mayor magnitud y se realizó un análisis de sus formas de onda y contenido espectral, con la intención de asociar su lugar de origen con respecto a los eventos sísmicos localizados. Además de resaltar que diferencias se presentaron en cuanto a nuestras dos acumulaciones. Los que presentaron características similares en cuanto a su forma de onda y análisis de frecuencia espectral. (Mostrado en la Figuras 4.3 y 4.4)

Asimismo se realizó un análisis con razón a estos eventos inducidos por el proceso de enfriamiento del pozo con eventos tectónicos posteriormente localizados, estos eventos se encuentran localizados en la Falla la Virgen y se presentan en el año 2010, con la finalidad de determinar si existe alguna diferencia entre los mismos. Los resultados nos muestran que al observar las señales de ondas sísmicas de estos eventos las diferencias no son observables, sin embargo si muestra un cambio en cuanto a su contenido espectral, siendo mayor para los eventos inducidos que los tectónicos. (Mostrado en la Figura 4.7)

Debido a este cambio, se realizó el análisis de los parámetros de fuente de ambos tipos de eventos, para visualizar de manera más detallada las diferencias existentes entre los mismos, los resultados de estos parámetros se muestran en la siguiente tabla:

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

PARÁMETRO	INDUCIDOS	TECTÓNICOS
$M_0$	4.4E09---1E11	3.2E10---6.91E12
ST	0.006---0.146 bar	0.038---2.1 bar
$F_0$	4---12 Hz	6---14 Hz
R	75---250 m	80---215 m
$M_w$	0.4---1.4	0.8---1.8
PROF.	1---2 km	2---6km

Aun cuando las tendencias van de acuerdo a sismos tectónicos de subducción e intraplaca, para estos sismos corticales y superficiales y de magnitud pequeña, tanto inducidos como tectónicos presentan diferencias importantes entre ellos. A continuación resumimos estas diferencias o similitudes:

1. La caída de esfuerzos (ST) y el momento sísmico ( $M_0$ ) para los sismos inducidos es menor que los tectónicos.
2. Mientras que la frecuencia de esquina ( $F_0$ ) y el radio de ruptura (R) son similares, así como la magnitud de momento ( $M_w$ ).
3. Los eventos Tectónicos cuentan con una mayor profundidad que los eventos inducidos.

Por otro lado, la experiencia de muchos estudios nos dice que los eventos de subducción e intraplaca, la caída de esfuerzos deben incrementarse y la frecuencia de esquina disminuir con respecto al momento sísmico (Scherbaum and Kisslinger, 1984; Garcia et al., 2004, tomado de Viegas, G. y Hutchings, L. (2011). *Characterization of Induced Seismicity near an Injection Well at the Northwest Geysers Geothermal Field, California*. GRC Transactions, Vol. 35). En este trabajo, se confirma la observación con respecto a la caída de esfuerzos en ambos casos (figura 4.10), sin embargo para la frecuencia de esquina se observa una tendencia casi constante con respecto al momento en cuanto a los eventos tectónicos (figura 4.11), sin embargo en los eventos inducidos se puede observar que la frecuencia esquina disminuye con respecto al momento.

Estudios previos sugieren que los sismos inducidos por el llenado de presas hidroeléctricas y por la explotación en la industria minería, tienen una menor caída de esfuerzos que la sismicidad natural (véase, por ejemplo, Abercrombie y Leary [1993], tomado de Viegas, G. y Hutchings, L. (2011). *Characterization of Induced Seismicity near an Injection Well at the Northwest Geysers Geothermal Field, California*. GRC Transactions, Vol. 35). Sin embargo otros estudios no encuentran ninguna diferencia entre la caída de esfuerzo de la sismicidad natural e inducida [Tomic et al., 2009, tomado de Viegas, G. y Hutchings, L. (2011). *Characterization of Induced Seismicity near an Injection Well at the Northwest Geysers Geothermal Field, California*. GRC

## SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACION DEL POZO LV-6 DEL CAMPO GEOTÉRMICO TRES VIRGENES, B.C.S.

---

Transactions, Vol. 35], y especulan que los estudios anteriores pueden sufrir de corrección de atenuación inapropiada, la asunción de la velocidad de ruptura constante en todas las magnitudes, o inadecuadas supuestos del modelo de origen.

En nuestro caso, la diferencia en cuanto a sus profundidades de estos sismos inducidos y tectónicos dentro de un campo geotérmico, no creemos que sea la única causa de las diferencias y similitudes observadas entre estos dos grupos de sismos. Un análisis más profundo en cuanto a su origen, donde tiene que ver la presión de poro, temperatura, estratigrafía, esfuerzos externos, etc., en cada uno de estos procesos de los sismos inducidos y tectónicos, tiene que ser el camino correcto para encontrar el origen de estas diferencias y similitudes. Sin embargo los objetivos y alcances de este trabajo no alcanzan para realizar estos análisis.

### Conclusiones:

1. Se encontró un aumento de sismicidad en el proceso de estimulación acida del pozo LV-6 cerca de la falla el Volcán. Iniciándose a partir de 16 de diciembre, la cual comienza con el último metro físico perforado y muestra un conteo de hasta 128 sismos el día 25 y 26 de diciembre la cual corresponde con el enfriamiento del pozo.
2. Se pudo contar un total de 398 sismos en todo el proceso, de los cuales se localizaron 41, que muestran dos acumulaciones significativas. Los eventos de ambas acumulaciones cuentan con las mismas características en cuanto a su forma de onda y análisis espectral, así mismo los eventos no localizados.
3. Por lo tanto, esta sismicidad fue INDUCIDA, debido a su distribución espacial y profundidad (mostrado en la Figura 3.13) y a su correlación con los procesos de estimulación del pozo. (mostrado en las Figuras 3.9 y 3.10)
4. La sismicidad tiene un azimut de  $231^\circ$  con dirección al SW con respecto del pozo, abarcando un área aproximada de  $919.5\text{m}^2$  y a una distancia aproximada de 1.5km del mismo, esta a su vez se encuentran localizada sobre el sistema de fallas, sobre la falla el volcán a una profundidad de entre los 1.5 y 2.5 km.
5. Por otro lado, una comparación de los eventos inducidos respecto de los tectónicos en cuanto a su forma espectral, los primeros cuentan con una banda de frecuencias mayor que los eventos tectónicos. Así mismo, sus parámetros de fuente obtenidos a 25 sismos inducidos y 18 tectónicos muestran diferencias o similitudes:
  - a) De acuerdo a las líneas de tendencia, la caída de esfuerzos (ST) y el momento sísmico (Mo) para los sismos inducidos es menor que los tectónicos.
  - b) Mientras que la frecuencia de esquina (Fo) y el radio de ruptura (R) son similares, así como la magnitud de momento (Mw).
  - c) Sin embargo, los eventos Tectónicos cuentan con una mayor profundidad que los eventos inducidos.



## ANEXO A

Tabla que muestra los parámetros hipocentrales de los 187 localizados. La fecha está dado por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora GMT en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof., la profundidad focal en kilómetros; error de la localización RMS, la raíz media cuadrática en segundos, magnitud de duración (Mc).

N° DE SISMO	FECHA AA/MM/DD	HORA GMT HH:MM:SS	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	PROF. (Km)	RMS (s)	MC (grados)
1	02/06/2009	00:27:50	27.543	-112.567	5.3	0	1.5
2	02/06/2009	10:40:25	27.407	-112.56	2	0.2	1.6
3	02/06/2009	14:35:40	27.497	-112.579	2	0	1.2
4	02/06/2009	14:41:33	27.498	-112.577	1.1	0.1	0.8
5	04/06/2009	10:28:05	27.475	-112.64	8.9	0.3	1.9
6	07/06/2009	13:15:24	27.491	-112.589	1.5	0.2	0.9
7	07/06/2009	10:17:17	27.528	-112.567	5.1	0	1
8	12/06/2009	10:06:09	27.462	-112.574	6.7	0.1	0.4
9	12/06/2009	19:13:04	27.484	-112.597	1.8	0.1	0.8
10	18/06/2009	04:12:52	27.531	-112.588	5.6	0	1.8
11	20/06/2009	20:42:41	27.517	-112.595	2	0	1.6
12	22/06/2009	10:51:46	27.527	-112.57	4.9	0	1.3
13	23/06/2009	15:14:25	27.561	-112.572	4.7	0.2	1.7
14	26/06/2009	10:34:36	27.548	-112.474	21.6	0	2.7
15	28/06/2009	01:36:07	27.413	-112.59	6.2	0	1.4
16	01/07/2009	04:52:34	27.498	-112.598	6.4	0	2.3
17	03/07/2009	19:52:36	27.482	-112.571	4.9	0.1	1.4
18	11/07/2009	19:48:33	27.432	-112.586	0.5	0.2	2.6
19	19/07/2009	05:00:30	27.487	-112.58	0.6	0	1.4
20	24/07/2009	21:21:52	27.481	-112.568	2	0.1	1
21	25/09/2009	13:00:51	27.59	-112.55	8.7	0	1.7
22	26/09/2009	16:14:48	27.438	-112.567	2	0.1	2.1
23	28/09/2009	16:51:21	27.51	-112.565	4.6	0	1.8
24	01/10/2009	18:18:51	27.571	-112.556	7.4	0	1.4
25	09/10/2009	18:13:08	27.48	-112.599	2	0	2.2
26	19/10/2009	00:51:56	27.503	-112.593	3.8	0	1.8
27	22/10/2009	17:18:35	27.512	-112.564	4.5	0	2.1
28	15/11/2009	16:19:27	27.496	-112.565	3.6	0.1	1.2
29	19/11/2009	16:12:28	27.513	-112.566	3.9	0.1	1.6
30	19/11/2009	16:47:13	27.582	-112.561	8.9	0	1.7
31	25/11/2009	10:18:57	27.584	-112.564	9.8	0	1.7
32	25/11/2009	10:36:46	27.57	-112.55	10.8	0	0.8
33	26/11/2009	02:38:31	27.541	-112.521	9.1	0	1



SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO  
GEOTÉRMICO TRES VIRGENES



34	26/11/2009	03:23:15	27.548	-112.506	9	0	1.3
35	26/11/2009	03:23:15	27.566	-112.489	9.4	0	2
36	27/11/2009	20:52:42	27.431	-112.475	6.3	0.1	1.4
37	28/11/2009	00:59:17	27.514	-112.557	3.9	0	1.3
38	28/11/2009	01:00:54	27.511	-112.558	3.2	0	0.2
39	04/12/2009	13:20:26	27.522	-112.584	4.3	0	0.3
40	08/12/2009	01:21:33	27.484	-112.572	1.6	0.1	2.2
41	16/12/2009	12:54:39	27.516	-112.567	4.2	0	1.9
42	16/12/2009	14:06:12	27.521	-112.571	3.7	0	1.9
43	16/12/2009	14:35:14	27.523	-112.569	4.2	0	1.5
44	19/12/2009	17:15:52	27.501	-112.575	2.1	0.1	1.6
45	19/12/2009	17:17:03	27.504	-112.57	3.5	0.1	1.8
46	19/12/2009	17:18:49	27.499	-112.571	3.1	0	1.4
47	19/12/2009	21:35:53	27.501	-112.572	3.1	0	2
48	20/12/2009	01:05:09	27.5	-112.571	1.9	0	1.7
49	25/12/2009	11:13:33	27.501	-112.57	1.5	0	2.6
50	25/12/2009	11:27:56	27.5	-112.571	1.7	0.1	2.1
51	25/12/2009	12:01:15	27.499	-112.574	2	0.1	0.8
52	25/12/2009	12:33:10	27.5	-112.571	3.2	0.1	2
53	25/12/2009	12:45:28	27.504	-112.572	1.5	0.1	1.9
54	25/12/2009	12:56:23	27.499	-112.57	3.4	0	2
55	25/12/2009	13:01:12	27.5	-112.572	1.5	0	1.9
56	25/12/2009	13:55:56	27.5	-112.572	1.5	0	1.2
57	25/12/2009	14:26:44	27.498	-112.573	1.6	0	2.3
58	25/12/2009	14:32:55	27.5	-112.573	1.5	0	1.6
59	25/12/2009	15:34:29	27.499	-112.573	1.8	0	1.9
60	25/12/2009	16:10:59	27.5	-112.571	3	0	1.3
61	25/12/2009	16:21:58	27.5	-112.574	1.7	0.1	1.9
62	25/12/2009	16:34:16	27.499	-112.57	3.4	0	1.6
63	25/12/2009	22:44:34	27.479	-112.59	1.5	0.1	1.7
64	25/12/2009	23:51:59	27.505	-112.571	1.8	0	1.3
65	25/12/2009	23:53:34	27.5	-112.573	1.6	0.1	-0.2
66	26/12/2009	01:37:05	27.502	-112.57	3.4	0	1.5
67	26/12/2009	06:00:55	27.5	-112.573	1.5	0	1.6
68	26/12/2009	06:08:12	27.497	-112.572	1.7	0.1	1.4
69	26/12/2009	06:09:57	27.495	-112.573	1.7	0.1	1.5
70	26/12/2009	07:02:39	27.5	-112.573	1.7	0	2.5
71	26/12/2009	07:03:58	27.496	-112.568	1.5	0.1	1.7
72	26/12/2009	07:56:53	27.504	-112.572	1.9	0	1.5
73	26/12/2009	10:12:32	27.501	-112.573	1.5	0	1.4
74	26/12/2009	10:44:36	27.5	-112.572	1.7	0	1.9
75	26/12/2009	15:09:52	27.485	-112.59	1.9	0	2.2



SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO  
GEOTÉRMICO TRES VIRGENES



76	26/12/2009	22:34:28	27.501	-112.573	1.7	0.1	2
77	26/12/2009	22:35:22	27.501	-112.573	1.6	0.1	2.1
78	27/12/2009	15:10:35	27.508	-112.564	1.5	0.1	2
79	29/12/2009	14:59:51	27.496	-112.571	1.7	0.1	-0.7
80	02/01/2010	14:08:21	27.558	-112.567	7.3	0.1	1.7
81	05/01/2010	02:25:12	27.481	-112.462	8.7	0	1
82	05/01/2010	02:25:12	27.492	-112.457	8.7	0	2
83	05/01/2010	03:20:22	27.403	-112.558	5.6	0.1	1.8
84	05/01/2010	11:39:55	27.429	-112.51	5.7	0	2.2
85	05/01/2010	19:15:56	27.437	-112.52	6.4	0.1	1.7
86	06/01/2010	08:21:40	27.509	-112.587	4.8	0	0.7
87	06/01/2010	08:41:58	27.517	-112.589	4.6	0.1	1.3
88	06/01/2010	08:47:21	27.502	-112.582	4.5	0	0.9
89	06/01/2010	08:52:00	27.5	-112.583	4.7	0	0.5
90	07/01/2010	00:21:24	27.52	-112.627	5.6	0	1.6
91	07/01/2010	02:35:15	27.478	-112.613	6.8	0	2.1
92	10/01/2010	17:50:55	27.481	-112.565	9.1	0	1.7
93	11/01/2010	12:48:49	27.544	-112.539	7.6	0	1.8
94	12/01/2010	05:50:07	27.507	-112.601	5.7	0	1.2
95	16/01/2010	20:12:03	27.525	-112.585	4.5	0	2.3
96	18/01/2010	04:39:51	27.449	-112.489	6	0	1.5
97	23/01/2010	17:42:29	27.514	-112.554	3.6	0	1.8
98	28/01/2010	13:13:38	27.513	-112.592	5.2	0	1.6
99	30/01/2010	02:51:43	27.464	-112.603	4.9	0	2.1
100	30/01/2010	07:39:12	27.513	-112.577	5.3	0	1.3
101	31/01/2010	03:42:07	27.444	-112.509	6.9	0.1	2.3
102	02/02/2010	10:51:59	27.469	-112.629	8.5	0.1	2.6
103	05/02/2010	04:25:13	27.475	-112.562	7	0	1.6
104	06/02/2010	08:01:45	27.576	-112.56	8.2	0	1
105	06/02/2010	08:16:58	27.578	-112.554	7.9	0	1.6
106	08/02/2010	23:04:37	27.505	-112.562	2.6	0	1.5
107	11/02/2010	13:03:27	27.429	-112.537	10.8	0.1	1.4
108	20/03/2010	04:55:47	27.525	-112.64	5.5	0	0.7
109	22/03/2010	08:35:21	27.525	-112.613	3.4	0	1.4
110	29/03/2010	18:19:30	27.406	-112.529	5.4	0.1	2.3
111	02/04/2010	05:12:44	27.525	-112.562	5.5	0	1.5
112	02/04/2010	15:16:27	27.49	-112.598	5.4	0	1.5
113	02/04/2010	15:16:52	27.491	-112.597	5.3	0	1.6
114	02/04/2010	15:44:35	27.523	-112.588	5.1	0	1.1
115	03/04/2010	05:23:48	27.485	-112.594	4.4	0	2.4
116	05/04/2010	07:03:45	27.486	-112.592	5.3	0.1	1.6
117	05/04/2010	07:03:46	27.487	-112.594	4.6	0	1.9





SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO  
GEOTÉRMICO TRES VIRGENES



118	05/04/2010	07:17:04	27.487	-112.594	4.6	0.1	1.9
119	06/04/2010	10:34:58	27.47	-112.633	6.6	0	1.6
120	06/04/2010	13:15:55	27.468	-112.63	5.8	0	2.1
121	07/04/2010	03:24:29	27.481	-112.596	5	0	1.1
122	08/04/2010	22:57:15	27.498	-112.597	4.7	0	1.6
123	12/04/2010	02:48:42	27.491	-112.592	4.1	0	1.8
124	12/04/2010	06:24:08	27.491	-112.591	4.7	0.1	1.4
125	12/04/2010	20:40:56	27.49	-112.592	4.4	0	1.2
126	12/04/2010	20:41:17	27.491	-112.593	4.4	0	2.1
127	12/04/2010	20:42:43	27.491	-112.592	4.1	0	2
128	12/04/2010	20:44:25	27.493	-112.593	3.8	0	1.5
129	15/04/2010	03:52:55	27.528	-112.617	4.4	0	0.9
130	16/04/2010	01:17:38	27.452	-112.624	7	0.1	2.4
131	17/04/2010	05:37:22	27.539	-112.508	6.8	0	0.8
132	19/04/2010	02:58:39	27.504	-112.587	4.1	0.1	1.7
133	19/04/2010	02:59:06	27.505	-112.586	4.2	0	1.5
134	19/04/2010	03:00:13	27.498	-112.585	3.9	0.1	2.1
135	19/04/2010	10:39:36	27.475	-112.632	6.7	0	2.4
136	20/04/2010	09:28:18	27.54	-112.57	6.4	0	1.7
137	20/04/2010	13:53:36	27.531	-112.586	5.7	0.1	2.3
138	21/04/2010	12:05:39	27.475	-112.626	6.4	0	1.6
139	21/04/2010	14:12:31	27.517	-112.571	4.9	0	2
140	22/04/2010	04:26:15	27.518	-112.587	5	0	1.7
141	22/04/2010	08:05:53	27.491	-112.591	4.8	0	1.4
142	23/04/2010	18:21:33	27.483	-112.596	4.5	0.1	1.7
143	23/04/2010	18:22:15	27.491	-112.596	5	0	1.7
144	23/04/2010	18:49:47	27.475	-112.592	3.8	0	1.9
145	23/04/2010	22:06:58	27.439	-112.496	10.7	0.1	2.5
146	23/04/2010	22:17:20	27.481	-112.594	4.6	0.1	1.8
147	23/04/2010	22:17:48	27.478	-112.595	4.1	0	1.5
148	23/04/2010	22:40:08	27.479	-112.594	3.6	0	2.1
149	24/04/2010	10:17:08	27.481	-112.594	4.3	0	1.9
150	25/04/2010	21:25:06	27.599	-112.557	9	0	1.8
151	27/04/2010	00:29:35	27.489	-112.591	5.1	0.1	1.4
152	01/05/2010	21:32:22	27.496	-112.578	4.1	0.1	1
153	02/05/2010	10:17:46	27.481	-112.59	4.1	0.1	1.8
154	02/05/2010	10:18:34	27.479	-112.591	4	0	2.2
155	02/05/2010	10:36:05	27.478	-112.591	4.2	0	1.2
156	02/05/2010	18:36:37	27.477	-112.592	3.8	0.1	2.3
157	02/05/2010	18:37:39	27.48	-112.591	4	0	2.3
158	03/05/2010	01:55:12	27.477	-112.593	4.1	0	1.5
159	03/05/2010	15:53:48	27.496	-112.581	4.3	0.1	1.1



SISMICIDAD INDUCIDA ASOCIADA A LA ESTIMULACIÓN DEL POZO LV-6 DEL CAMPO  
GEOTÉRMICO TRES VIRGENES



160	04/05/2010	06:06:08	27.477	-112.594	4.4	0	1.5
161	05/05/2010	07:36:46	27.479	-112.592	3.9	0	1.9
162	05/05/2010	13:19:41	27.482	-112.595	4.8	0.1	1.1
163	05/05/2010	20:50:15	27.467	-112.598	3.5	0.1	1.4
164	05/05/2010	23:13:43	27.482	-112.589	3.9	0	1.6
165	06/05/2010	04:44:21	27.495	-112.583	4.4	0	0.9
166	06/05/2010	12:40:32	27.48	-112.583	2.8	0.1	0.6
167	06/05/2010	18:11:46	27.484	-112.589	4.3	0	1.4
168	06/05/2010	22:32:58	27.486	-112.59	3.9	0	1.1
169	06/05/2010	22:43:47	27.483	-112.59	3.5	0.1	1.8
170	06/05/2010	22:46:18	27.482	-112.59	3.5	0	1.1
171	06/05/2010	23:08:15	27.515	-112.581	5.1	0.1	1.3
172	09/05/2010	08:12:40	27.482	-112.576	0.5	0.2	0.9
173	10/05/2010	03:15:16	27.513	-112.564	6.2	0.2	0.9
174	10/05/2010	03:16:13	27.511	-112.566	5.6	0.2	1.2
175	10/05/2010	09:03:29	27.488	-112.584	2	0.2	0.5
176	10/05/2010	09:13:46	27.492	-112.583	2	0.2	1.1
177	10/05/2010	09:16:45	27.491	-112.584	3	0.2	0.7
178	13/05/2010	19:58:31	27.515	-112.581	4.7	0.1	1.7
179	14/05/2010	10:15:00	27.517	-112.581	4.7	0.1	1.3
180	14/05/2010	18:52:05	27.518	-112.581	5	0.1	1.2
181	14/05/2010	20:10:15	27.52	-112.578	5.1	0.1	0.6
182	15/05/2010	03:52:49	27.515	-112.582	5.3	0.1	1.1
183	15/05/2010	05:11:18	27.516	-112.564	6.2	0.2	0.7
184	15/05/2010	05:11:28	27.519	-112.562	6.4	0.2	0.6
185	15/05/2010	06:59:39	27.515	-112.581	4.6	0.1	0.9
186	18/05/2010	14:25:28	27.529	-112.578	0.8	0.2	1.3
187	28/05/2010	07:22:28	27.46	-112.598	7.2	0.2	1.2



## Bibliografías

Antayhua, V. (2007). *Sismicidad en el campo geotérmico de los humeros-puebla (1997-2004), su relación con los pozos y la tectónica local*. Tesis M. México. UNAM, Instituto de Geofísica 145 pp.

Blodgett, L. y Slack, K. (2009). *Geothermal 101: Basic of Geothermal Energy Production and use*. Washington, DC: Geothermal Energy Association.

[http://www.geo-energy.org/publications/reports/Geo101\\_Final\\_Feb\\_15.pdf](http://www.geo-energy.org/publications/reports/Geo101_Final_Feb_15.pdf).

Hernández, P., Sánchez, M., Gómez, G. y Tapia, R. (2010). *Informe final de resultados de la Perforación y estimulación ácida del Pozo LV-6*. (RTV-RE-03-2010). Informe elaborado para Comisión Federal de Electricidad.

Hiriart, G. (2011). *Tecnologías de punta y costos asociados para Generación Distribuida, Autoabastecimiento y Cogeneración con Recursos Geotérmicos en México*. Financiado por Energy Sector Management Assistance Program. 67pp.

Huanca J. *Origen, clasificación y análisis de las señales sismo-volcánicas*. Artículo del Observatorio Moquegua, Perú.

[http://observatoriomoquegua.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=26&Itemid=53&showall=1](http://observatoriomoquegua.org/index.php?option=com_content&view=article&id=26&Itemid=53&showall=1)

Lermo, J., Vargas, A., Urban, E., Rodríguez, H., Núñez, F. y Espitia, G., 2010, *Estudio de sísmica pasiva en Las Tres Vírgenes, BCS., Periodo 2010, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México*, realizado para CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Departamento de Exploración, proyecto CFE-DEV-DGF-TV-25-10, México, 60 pp.

Macías, J; Jiménez, E., et al. 2013, *Estudio de Estratigrafía y Geología del complejo volcánico Tres Vírgenes, B.C.S. (Reporte DEX-DGL-TV-17-11)*. México. 104pp.

Maya, R. y Gutiérrez, L. (2007). *Recursos geotérmicos para generar electricidad en México*. Revista Digital Universitaria, Volumen 8 Número 12, ISSN: 1067-6079, 13pp.

Maxwell, S. (2014). *Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs*. Sponsored by the Society of Exploration Geophysicists.



- Ottmoller, L., Voss P and Havskov, J., 2012, *SEISAN. Earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and MacOSX*. Versión 9.1. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Bergen, Norway. 372 pp
- Ramírez, M., Morales, L., et al. (2013). *Selección del orificio de integración para mejorar la vida útil del pozo Lv-6 del Campo geotérmico las Tres Vírgenes*. México. Geotermia Vol. 26, No. 1. 44-52pp.
- Rodríguez, M. (2000). *Procesado e interpretación de datos sísmicos registrados en la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, B.C.S. en el periodo Diciembre 1995-Julio 1996*. Informe elaborado para la Gerencia de Proyectos Termoeléctricos. Enero de 1999.
- Venegas, S., Arredondo, J., Ramírez, G., Flores, M., Ramírez, M. 2006. *Monitoreo sísmico durante la estimulación ácida de los pozos LV-4 y LV-13 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S., México*. Geotermia Vol. 19, No. 2. 13-23
- Viegas, G. y Hutchings, L. (2011). *Characterization of Induced Seismicity near an Injection Well at the Northwest Geysers Geothermal Field, California*. GRC Transactions, Vol. 35. 8 pp.
- Urbán, E. (2010). *Relación de actividad local, pozos inyectoros y fallas activas en los Campos Geotérmicos en México*. Tesis L. México. UNAM, Instituto de Geofísica 117 pp.