



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTADO DE ESFUERZOS EN LA REGIÓN GEOTÉRMICA
DE TRES VÍRGENES, B.C.S.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

JULIO CÉSAR ROMERO DOMÍNGUEZ

TUTOR:

M. C. JAVIER FRANCISCO LERMO SAMANIEGO



México, D.F.

2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Mi principal y más grande agradecimiento es para la UNAM, la universidad que me dio un lugar para poder estudiar la carrera.

Al Instituto de Ingeniería que desde la mitad de mis estudios me ha dado un espacio en sus cubículos como becario y gracias por permitirme ayudar en sus proyectos de investigación, por ello fue posible este trabajo de tesis.

A mi tutor de tesis *M. C. Javier Francisco Lermo Samaniego* gracias por darme la oportunidad en participar con su equipo de trabajo, por su ayuda y experiencia para la realización de este trabajo.

A mis sinodales: Ing. Jorge Nieto Obregón, M. C. David Escobedo Zenil, Dr. Denis Xavier Francois Legrand y Dr. Carlos Miguel Valdés González, por su amable colaboración muchas gracias.

A *Yanet Antayhua* por su valiosa ayuda, enseñanzas, opiniones y consejos, muchas gracias *Yanet*.

A mis papás *Laura* y *Abel*, les agradezco por toda su paciencia, su amor, comprensión y su infinito apoyo, gracias a ustedes hoy soy lo que soy.

A *Itzel Hernández* gracias a ti por todos esos momentos divertidos que pasamos dentro y fuera del aula, por estar siempre ahí para contar contigo y por permitirme ser tu amigo.

A *Taty Hurtado* por ser una de las personas más importantes en mi vida gracias por tu amistad y porque a pesar de que sabes todo de mi me sigues queriendo.

A mi amigo *Demian López* quien siempre ha estado ahí para todo y por estar presente en las etapas más importantes de mi vida.

A *Rubendaro Valle* gracias por tu ayuda en los semestres más duros de la carrera, eres un gran amigo y, *Samuelisaac Valle*, *Isaí Sánchez*, *Marco*, *Rodrigo Durán*, *Johnnie Becerril*, *Julio Hernández*, *Diego Avalos*, les agradezco amigos por haber estado presentes en esta etapa universitaria.

“La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar.”

–Thomas Chalmers.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
1.1. FALLAS Y ESFUERZOS	7
1.2. ESFERA FOCAL	10
1.3. MECANISMOS FOCALES Y MÉTODOS PARA CONSTRUIRLOS.....	13
1.3.1. MÉTODO DE LOS PRIMEROS ARRIBOS DE ONDA P.....	13
1.3.2. MÉTODO DEL COCIENTE DE AMPLITUDES S/P O DE HASH	14
1.3.3. MÉTODO DE FPFIT	15
CAPÍTULO 2. ASPECTOS TECTÓNICOS Y GEOLÓGICOS	16
2.1. MARCO TECTÓNICO	16
2.2. MARCO GEOLÓGICO	18
2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y ESTRATIGRAFÍA.....	19
CAPÍTULO 3. SISMICIDAD EN EL CAMPO GEOTÉRMICO.....	23
3.1. MONITOREO SÍSMICO Y OPERATIVIDAD DE LAS ESTACIONES	23
3.2. PERIODOS DE REGISTRO DE DATOS	26
3.3. DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD.....	28
CAPÍTULO 4. PROCESAMIENTO DE DATOS	30
4.1. SOFTWARE UTILIZADO	30
4.2. RELACIÓN DE VELOCIDAD VP/VS	30
4.3. MODELO DE VELOCIDADES.....	30
4.4. ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA MAGNITUD.....	31
4.5. LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL Y SELECCIÓN DE EVENTOS	31
4.6. OBTENCIÓN DE MECANISMOS FOCALES	37
CAPÍTULO 5. ESTADO DE ESFUERZOS.....	41
5.1. INTERPRETACIÓN DE MECANISMOS FOCALES	41
5.2. DIAGRAMAS DE ROSETA	45
5.3. EJES P Y T Y ORIENTACIÓN DE ESFUERZOS	47

RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	51
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
REFERENCIAS	55
ANEXOS	57

RESUMEN

En el año 2003 se instaló una red sísmica de monitoreo en la región geotérmica de Tres Vírgenes B.C.S. con el fin de registrar la actividad sísmica del complejo volcánico. Durante el periodo 2003-2012 se lograron identificar 1273 sismos locales asociados a la región geotérmica, de los cuales se ha seleccionado 45 eventos de acuerdo a las siguientes restricciones: un mínimo de 4 estaciones, rms <0.1 s, error de localización <2.5 Km, claridad en lectura de fases P, S y sólo aquellos ocurridos dentro de una zona delimitada. La distribución de esta sismicidad se encuentran a lo largo de las principales fallas con profundidades que varían de los 3 hasta los 10.5 km y magnitudes de 0.4 a los 2.7 Mc. A estos eventos se le construyeron sus mecanismos focales mediante 3 métodos (FOCMEC, HASH Y FPFIT) usando el software SEISAN. La geología estructural del complejo volcánico presenta 2 sistemas de fallamiento predominantes, el sistema NW-SE y el sistema NNE-SSW. Tras la interpretación de los mecanismos focales se observa un repetitivo patrón de fallamiento lateral derecho con componente normal para los sistemas de fallas con dirección NW-SE (rumbo promedio de N40°W), los mecanismos asociados para las fallas con orientación NNE-SSW tienen soluciones con una marcada tendencia de tipo lateral izquierdo con componente normal (rumbo promedio de N18°E). Los diagramas de rosas de los ejes P y T indican que los esfuerzos dominantes de presión se encuentran orientados al NNW-SSE (un promedio de N11°W) y de tensión al E (un promedio de N82°E), esto quiere decir que los esfuerzos del campo geotérmico se encuentran dominados por el régimen tectónico regional, es decir, por el movimiento entre las placas norteamericana y del pacífico. Los mecanismos revelaron además la actividad a profundidad de las fallas La Virgen y Las Víboras, otros sugieren la influencia de la actividad hidrotermal en la ocurrencia de algunos sismos.

ABSTRACT

In 2003 a seismic monitoring network was installed in the geothermal region of Tres Vírgenes B.C.S, for the purpose of record the seismic activity in the volcanic complex. During the period 2003-2012 could be identified 1273 local earthquakes associated with geothermal region , of which 45 events are selected according to the following restrictions: a minimum of 4 stations , rms < 0.1 s , location error < 2.5 Km , reading clarity phases P and S and only those occurring within a defined area. The distribution of this seismicity is located along major faults with depths ranging from 3 to 10.5 km and magnitudes of 0.4 to 2.7 Mc. At these events you will built their focal mechanisms using 3 methods (FOCMEC, HASH and FPFIT) using the SEISAN software. The structural geology of the volcanic complex has two predominant faulting systems, the system NW -SE and NNE- SSW system. Following the interpretation of focal mechanisms observed repetitive pattern right lateral faulting with a normal component for fault systems with NW-SE direction (average direction N40°W) , the associated mechanisms for faults with NNE-SSW orientation have solutions with a strong left-type trend with normal component (average direction N18°E). Rose diagrams of the axes P and T indicate that stress are compression prevailing oriented NNW-SSE (average N11°W) and the extension E (average of N82°E), this means that geothermal field stress are dominated by the regional tectonic regime by movement between The Pacific Plate and North American Plate. The mechanisms also revealed activity at depth of the faults La Virgen and Las Víboras, others mechanisms suggest the influence of hydrothermal activity in the occurrence of some earthquakes

INTRODUCCIÓN

En México es frecuente encontrarse con paisajes volcánicos, pues en su evolución geológica grandes eventos han permitido el desarrollo de este tipo de estructuras naturales, algunos de estos campos volcánicos destacan no solo por su belleza natural o por el peligro que representan para las poblaciones aledañas también por los beneficios potenciales a la población como es el caso de los campos geotérmicos, los cuales ofrecen un recurso natural renovable y ecológico que es una alternativa para abastecer a la población de electricidad, por ello los campos geotérmicos son estudiados con mucho interés para determinar su eficiencia energética. Dentro de los principales campos geotérmicos del país que actualmente se encuentran en operación son: Cerro Prieto, B.C. Norte, Tres Vírgenes, B.C. Sur, Los Azufres, Michoacán y Los Humeros, Puebla (Figura 1.1), no obstante se han localizado más de mil manifestaciones geotérmicas en todo el país.



Figura 1.1- Localización de los principales campos geotérmicos de México.

Como parte del estudio de los campos geotérmicos se monitorea la actividad sísmica mediante sensores ubicados alrededor de la zona volcánica para analizar los eventos y obtener información acerca del subsuelo y su relación con los puntos de mayor manifestación hidrotermal. El análisis sísmico de los campos geotérmicos ofrece una variedad de aplicaciones a la geología del terreno, como puede ser el análisis geológico estructural mediante la obtención de mecanismos focales a lo que se le conoce como el estado de esfuerzos.

El estado de esfuerzos consta de un análisis de la actividad sísmica local que sirve para revelar información acerca de la condición actual de los sistemas de fallas, cuyo movimiento se encuentra dominado bajo un régimen tectónico a nivel regional. En el presente trabajo se muestra el estado de esfuerzos que rige el complejo volcánico derivado de un estudio de la sismicidad ocurrida dentro del periodo de 2003 a 2012 en la región geotérmica de Tres Vírgenes B.C.S.

Antecedentes

El primer estudio sobre el estado de esfuerzos en el campo geotérmico de Tres Vírgenes fue realizado por Wong y Munguía en 2005 el cual fue llevado a cabo utilizando datos con una red sísmica temporal instalada en el año de 1993 alrededor del complejo volcánico la cual recopiló datos durante 23 días, logrando localizar un total de 257 microsismos asociados a los edificios volcánicos del complejo y a principalmente a la falla La Virgen con magnitudes que varían de 1 a 3 y profundidades hasta los 8 Km; dentro del estudio también se estimaron los valores de la relación V_p/V_s en diferentes regiones del complejo ya que en la zona de estudio existían materiales con propiedades heterogéneas. Los resultados de los mecanismos focales indican una dirección de los ejes de presión predominante N-S y en los ejes de tensión una dirección predominante E-W.

Algunos otros estudios de sismicidad realizados en la región geotérmica se mencionan a continuación: López et al (1995), se realizaron un estudio geológico y geofísico del campo geotérmico, en dicho trabajo realizado por López et al (1995), se reportó un denso fracturamiento cercano al cañón El Azufre e intensa actividad hidrotermal. Desde entonces se ha incrementado la densidad de estudios de sismicidad en el campo geotérmico, tales como los trabajos de Wong y Munguía, (2001) que realizaron un procesamiento e interpretación de datos sísmicos con el objetivo de hacer un análisis de la atenuación de ondas de coda.

Luego en 2003 se llevó a cabo la instalación de una nueva red sísmica (estaciones temporales y permanentes) por el Instituto de Ingeniería 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 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 Macías y Jiménez (2013) realizaron un análisis más detallado sobre la Estratigrafía y Geología del complejo volcánico Tres Vírgenes 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.

Justificación

A pesar de los numerosos estudios geológicos y geofísicos que se han realizado en el campo geotérmico de Tres Vírgenes desde hace 20 años, únicamente en el año 2005 Wong y Munguía llevaron a cabo un estudio de sismicidad con el fin de conocer el estado de esfuerzos dominante en la región geotérmica, no obstante la información recopilada por la red sísmica temporal estuvo limitada a eventos registrados en un periodo de 23 días en el año de 1993. Por esta razón la intención de este trabajo es utilizar la información geológica actualizada del complejo volcánico y una base de datos que ha sido recopilada por una red sísmica permanente instalada a partir del año 2003 y hasta el año 2012 con el fin de comparar los resultados obtenidos por Wong y Munguía, 2005 al estimar el estado de esfuerzos vigente.

Objetivos

A partir de la recopilación (2003-2012) de registros sísmicos obtenidos con una red de acelerómetros y sismómetros instalada en los alrededores del complejo volcánico de Tres Vírgenes, el objetivo de este estudio, es relocalizar un conjunto de eventos sísmicos seleccionados para obtener sus parámetros de fuente y conocer el actual estado de esfuerzos que rige en Tres Vírgenes B.C. Sur, así se podrá encontrar el movimiento relativo de las fallas más activas en el campo geotérmico.

Alcances

El presente trabajo está limitado a una zona de estudio en la parte central del complejo volcánico ya que es donde la cobertura de la red sísmica nos otorga mayor certidumbre en la localización hipocentral.

Desarrollo del trabajo

Capítulo 1. En este capítulo se hablara sobre los fundamentos teóricos necesarios para comprender la fuente sísmica, los conceptos básicos de una falla geológica, los tipos de fallas existentes en la naturaleza y la definición de sus parámetros los cuales describen la geometría y movimiento relativo de la falla, así como la definición de mecanismo focal y los tipos de mecanismos que representan estereográficamente la geometría de la falla. Se mencionan por último, algunos métodos que se utilizaron para la construcción de los mecanismos expuestos en este trabajo.

Capítulo 2. Se presenta el 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 que incluye un modelo teórico de los esfuerzos dominantes y la columna estratigráfica actualizada que ha sido propuesta con base en los estudios previos más recientes.

Capítulo 3. En este capítulo se muestra la evolución de la red sísmica que monitorea el campo geotérmico, ubicación de las estaciones y la operatividad de estas a lo largo del tiempo, después se presenta la distribución de los sismos localizados a durante el periodo de estudio y por último se mencionan los criterios de selección de los datos utilizados para el procesamiento.

Capítulo 4. 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, el cálculo de su magnitud, su distribución en superficie y profundidad, y por último la obtención de los mecanismos focales de cada uno de los eventos sísmicos.

Capítulo 5. En este último capítulo se analizan los mecanismos focales con la ayuda de la información geológica estructural del complejo volcánico para determinar la dirección preferencial de los esfuerzos dominantes y se presentan los resultados finales del estudio.

Para terminar el trabajo escrito se discuten los resultados y los comentarios finales acerca del estudio.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los sismos son detectados por sismómetros que son dispositivos altamente sensibles que registran puntualmente el movimiento del terreno donde están situados, la información queda registrada en la memoria interna del sistema de adquisición en forma numérica y es enviada a centros de procesamiento para su posterior estudio.

Fallas y esfuerzos

Un sismo proveniente del subsuelo es causado por una ruptura en los materiales que por lo general es debido a la interacción de las placas tectónicas entre sí o por efectos secundarios de esta interacción como puede ser el vulcanismo, de ser así el sismo se dispara en sitios específicos del macizo rocoso en planos de ruptura provocando un desplazamiento brusco sobre ese plano, cada una de las zonas o volúmenes de roca que resultan de la superficie de ruptura se denominan bloque, el bloque que queda por arriba del plano de ruptura es el bloque de techo y el bloque por debajo del plano de ruptura es el bloque de piso; al conjunto de elementos formado por el bloque de techo, bloque de piso y plano de ruptura se le conoce como falla geológica.

Para describir una falla geológica se requiere de tres simples parámetros conocidos como rumbo (strike), echado (dip) y rake (o pitch), el rumbo es la línea horizontal contenida en el plano de falla, el echado es el ángulo de inclinación del plano de falla respecto a un plano horizontal perpendicular al rumbo y el rake es el ángulo que forma la dirección del desplazamiento a lo largo del plano de falla. La orientación de la falla está definida por el rumbo medido desde el norte entre 0° y 360° , en sentido de las manecillas del reloj. El ángulo del echado de la falla se mide entre 0° y 90° . La dirección del desplazamiento en un plano de falla se define por el vector de deslizamiento slip \mathbf{d} . El slip es definido por el ángulo del desplazamiento o rake λ ($-180^\circ \pm 180^\circ$) medido en el plano de falla (con la convención adoptada de considerar como positivos los casos en que se miden desde la horizontal hacia arriba, y los que se miden hacia abajo como negativos). El vector normal al plano de falla es \mathbf{n} . (Figura 2.1).

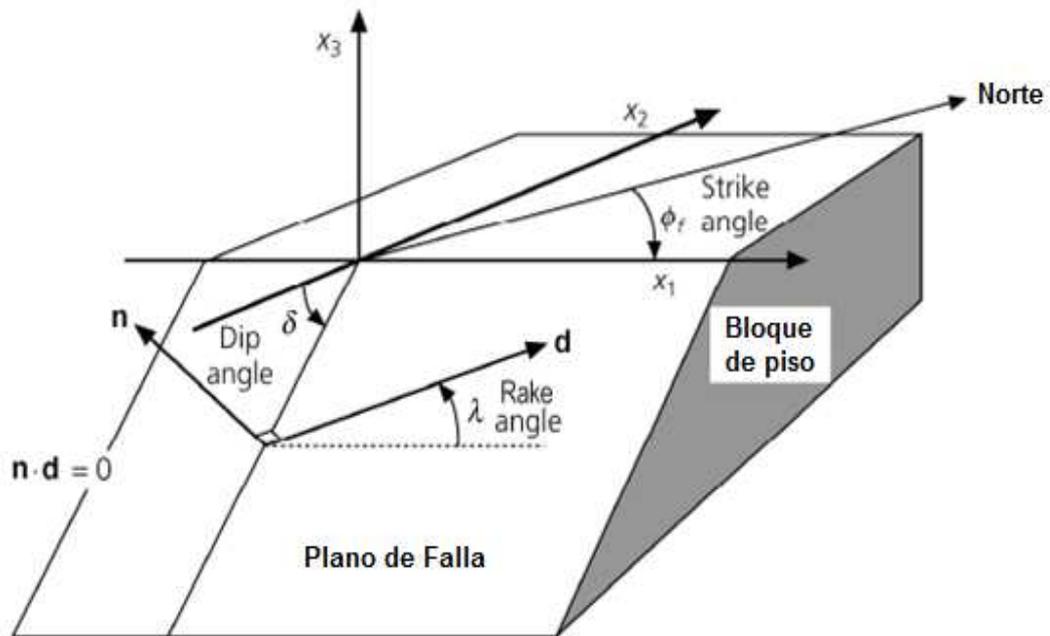


Figura 2.1. Geometría de una falla. Diferentes sistemas de coordenadas pueden ser usados, en este sistema, el eje x_1 es para la dirección del strike, x_2 es perpendicular a x_1 y se encuentra en la superficie del plano y el eje x_3 perpendicular a ambos ejes y en dirección hacia arriba.

Los bloques de la falla se desplazan uno con respecto al otro debido en función de los esfuerzos aplicados desde diferentes direcciones (esfuerzos diferenciales principales: σ_1 , σ_2 y σ_3). El movimiento provocado puede deberse a tres tipos de esfuerzos:

- Compresivos. Cuando los esfuerzos diferenciales acortan un cuerpo.
- Distensivos o Tensionales. Cuando los esfuerzos diferenciales tienden a alargar un cuerpo.
- De Cizalla. Cuando los esfuerzos no son coaxiales, y actúan como un par de fuerzas.

Los esfuerzos principales dan lugar a diferentes tipos de fallas según la dirección donde son aplicados. En la naturaleza las fallas geológicas rara vez tienen un movimiento simple pero para fines prácticos se han definido tres tipos de fallamiento los cuales son normal, inverso y transcurrente o lateral (Figura 2.2).

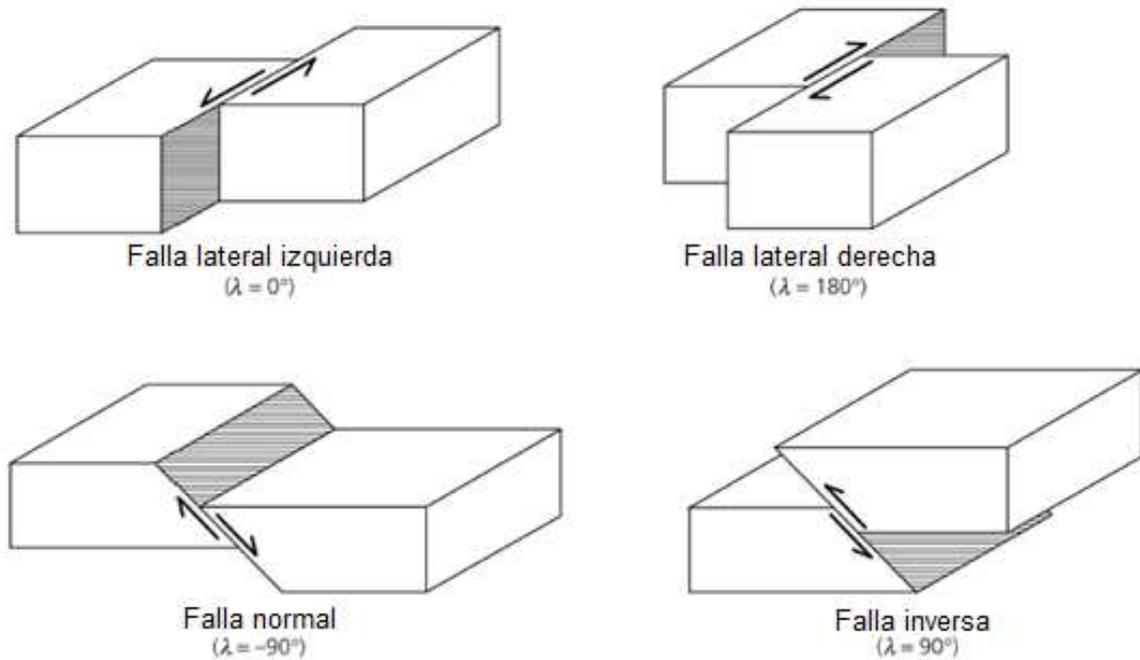


Figura 2.2. Estos ejemplos son los casos más simples de fallamiento, si una falla queda expuesta en la superficie del terreno se pueden obtener sus parámetros a partir de métodos directos o geológicos, sin embargo la mayoría de los sismos ocurren en regiones subterráneas, comúnmente sin expresión superficial, y para determinar sus parámetros es necesario usar métodos indirectos a partir de la información sísmica del lugar.

Los esfuerzos principales se ilustran de la siguiente manera según el tipo de falla (figura 2.3):

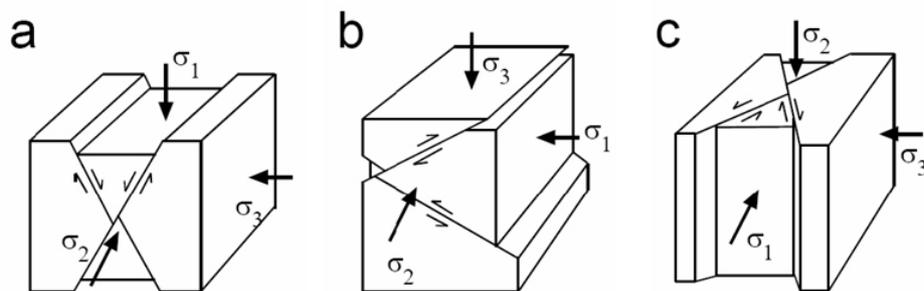


Figura 2.3. Dirección de los esfuerzos principales y su relación con los tipos de fallas. a) falla normal, b) falla inversa y c) falla transcurrente. En estos casos ideales, uno de los esfuerzos principales es vertical.

Cuando en una falla hay un deslizamiento, los dos bloques del plano de falla se mueven relativamente en dirección opuesta entre sí y cada bloque crea una diferente polaridad de onda P, o el primer movimiento enviado a diferentes direcciones. En la figura 2.4 se muestra la como sería el movimiento de la onda P en un sismograma. Las 2 flechas en el plano principal muestran la dirección del desplazamiento relativo entre sí. Las dos flechas en el plano auxiliar muestran el movimiento que debería ocurrir en un mismo sismograma. Las flechas indican el sentido del movimiento entre los bloques.

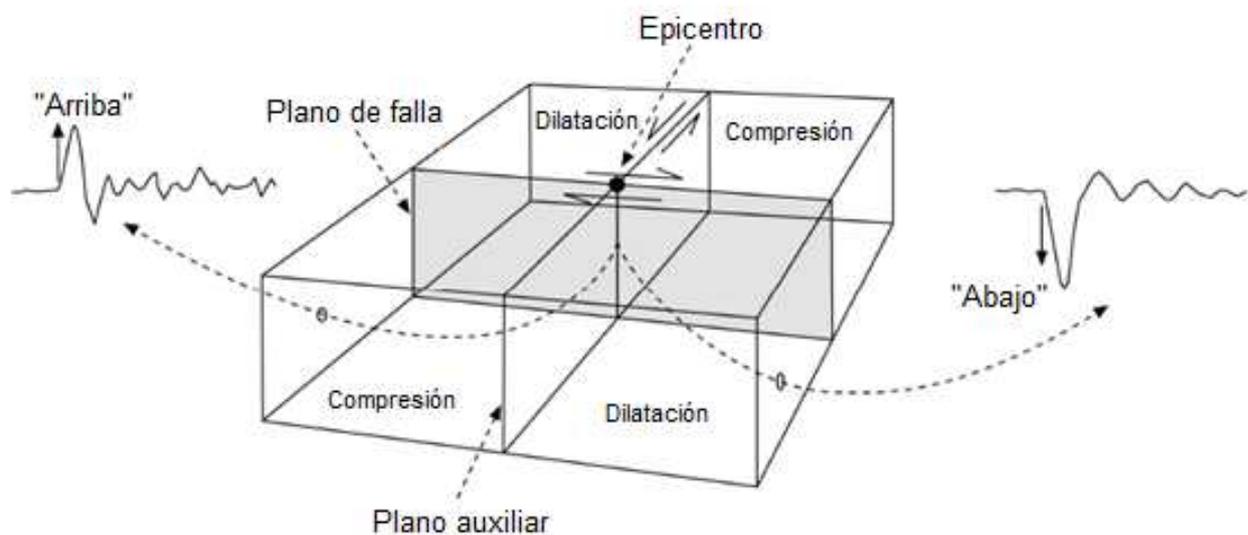


Figura 2.4. Primer movimiento de onda P observado en diferentes direcciones relativas al plano de falla para una falla lateral derecha.

En este simple ejemplo, la superficie de la tierra puede ser dividida en 4 cuadrantes cada uno tendría una polaridad (positiva o negativa) en el primer movimiento. Si el bloque de la falla se mueve hacia la estación, el primer movimiento es llamado compresión (**C**) y si el movimiento del bloque se aleja de la estación entonces es llamado dilatación (**D**). En la componente vertical de un sensor se observa en el sismograma correspondiente un movimiento hacia arriba para una polaridad positiva y un movimiento hacia abajo para la negativa.

Si las observaciones provistas a partir de varias estaciones, y distribuidas uniformemente están disponibles, la orientación de los dos planos podría ser fácilmente determinada dividiendo la superficie en 4 cuadrantes con diferente polaridad, sin embargo no es suficiente para saber cuál es el plano de falla sin el uso de información adicional como podría ser el uso de mapas geológicos o simplemente ver la traza de una falla en la superficie del terreno.

Otro par de fuerzas en el plano auxiliar, con una fuerza de torsión crearía las mismas observaciones en un sismograma, resulta entonces que las amplitudes de una onda sísmica producida por una falla pueden describirse matemáticamente como la radiación a partir de dos pares de fuerzas, también llamado doble par. Teniendo un segundo par de fuerzas se evita la rotación en un sistema de falla.

Esfera focal

La geometría de la falla normalmente no es fácil de describir como se aprecia en la figura 2. Con el fin de mostrar el plano de falla en dos dimensiones, el concepto de esfera focal es usado.

El principio de una esfera focal es observar los movimientos provenientes de un sismo en la superficie de una pequeña esfera centrada en el hipocentro. La superficie de la esfera será entonces dividida en 4 cuadrantes con dilatación y compresión mediante la intersección entre el plano de falla y el plano auxiliar (Figura 2.5).

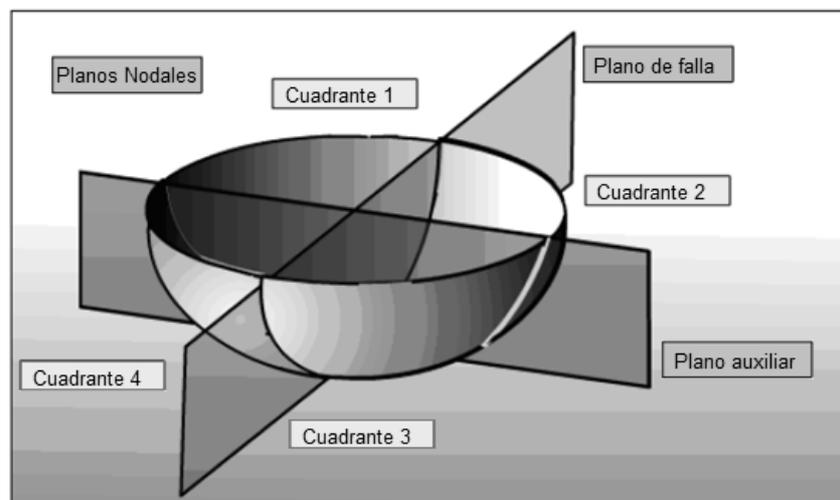


Figura 2.5. Parte inferior de la esfera focal cortada en 4 partes por los planos nodales.

Para la proyección de una esfera focal se utiliza la parte inferior vista desde arriba, las partes oscuras representan esfuerzos compresivos y las partes blancas esfuerzos extensivos (Figura 2.6).

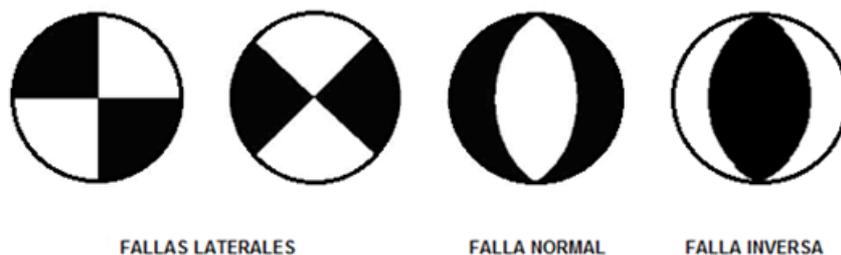


Figura 2.6. Ejemplos de fallas simples representadas por esferas focales.

En cada esfera focal se definen los ejes de máximo esfuerzo compresivo (**P**) y mínimo esfuerzo compresivo (**T**), eje de “tensión”. El eje intermedio conocido como eje nulo es perpendicular a los ejes **T** y **P**, también al deslizamiento y resulta ser la intersección de los dos planos nodales (Figura 2.7).

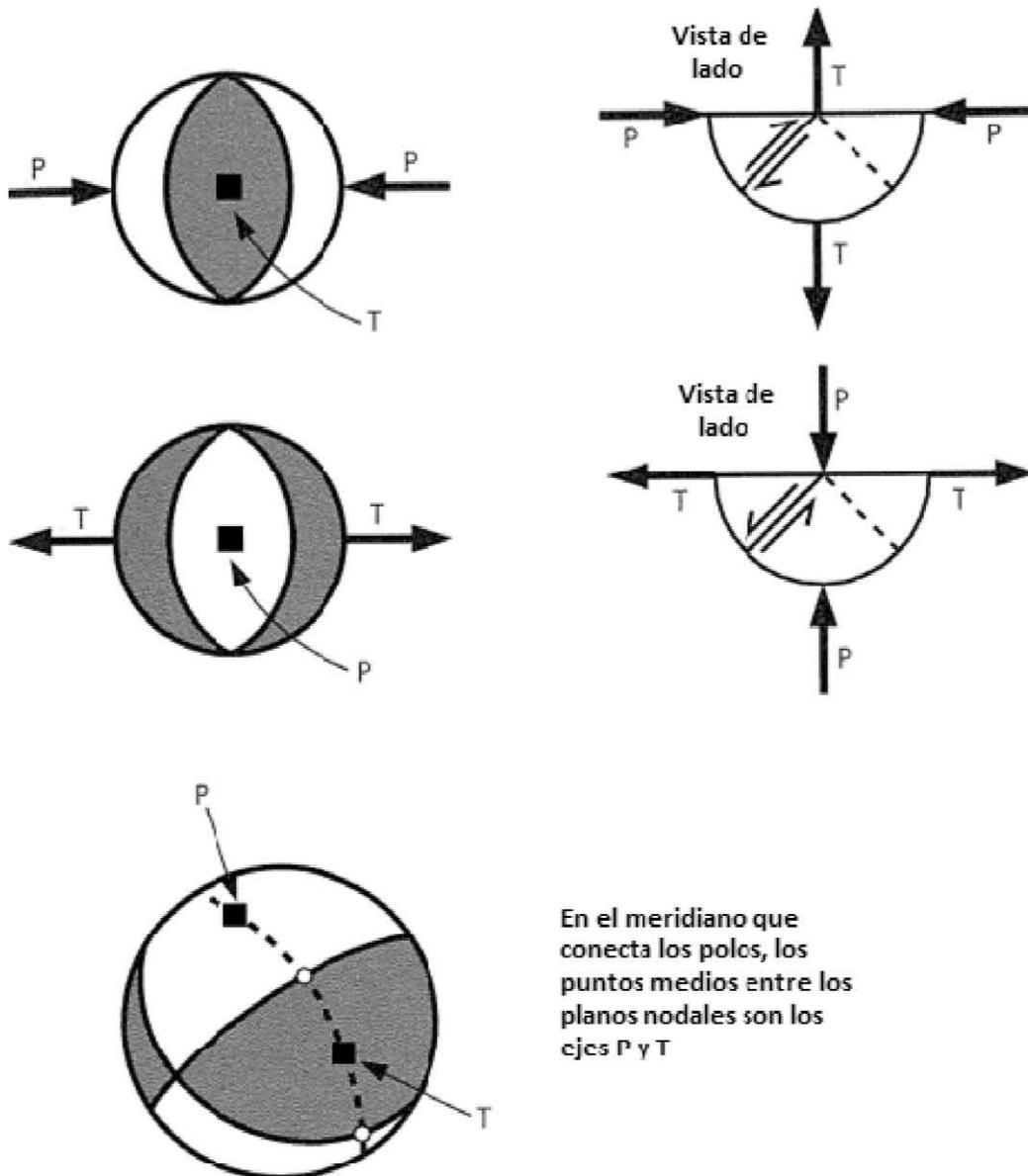


Figura 2.7. Se ilustra la relación entre los planos de falla y los ejes de máximo esfuerzo compresivo (P) y mínimo esfuerzo compresivo (T).

Mecanismos focales y métodos para construirlos

Las esferas focales sirven como medio para la representación de los mecanismos focales. Un mecanismo focal describe como rompe un sismo, es decir define la orientación del plano de falla y el movimiento sobre él. Resulta de un análisis de las ondas sísmicas generadas por un sismo y registradas por un conjunto de sismómetros, la información proporcionada por un mecanismo focal incluye el tiempo de origen del sismo, su magnitud, la ubicación del hipocentro en 3 coordenadas, y las los dos planos nodales.

Existen varias formas para determinar un mecanismo focal. En el presente trabajo se presentan las soluciones obtenidas a partir de tres diferentes métodos con el fin de confirmar la autenticidad de los resultados, según la disponibilidad de la información requerida para cada método, es decir, primero se utilizó la técnica de primeros arribos de la onda P, luego el método de cociente de amplitudes S/P de Hash y por ultimo si los datos lo permitieron se utilizó el método de FPFIT.

Método de los primeros arribos de onda P

Teniendo una muy buena cobertura de estaciones y conociendo el modelo de velocidades de una determinada región, es posible estimar el mecanismo focal, a partir de los registros de los primeros arribos de la onda P de cada una de las estaciones sísmicas que registran el evento. Ya que cada rayo que llega a una estación nos proporciona la orientación y polaridad de la onda, con estos valores se obtiene un conjunto de puntos los cuales son graficados en una red estereográfica según la ubicación de cada estación, asignándose un punto ya sea de compresión o dilatación. Posteriormente se trazan los planos nodales según la separación entre los puntos de compresión o dilatación, este procedimiento para construir mecanismos es el más común ya que puede realizarse sin la ayuda de un software (Figura 2.8).

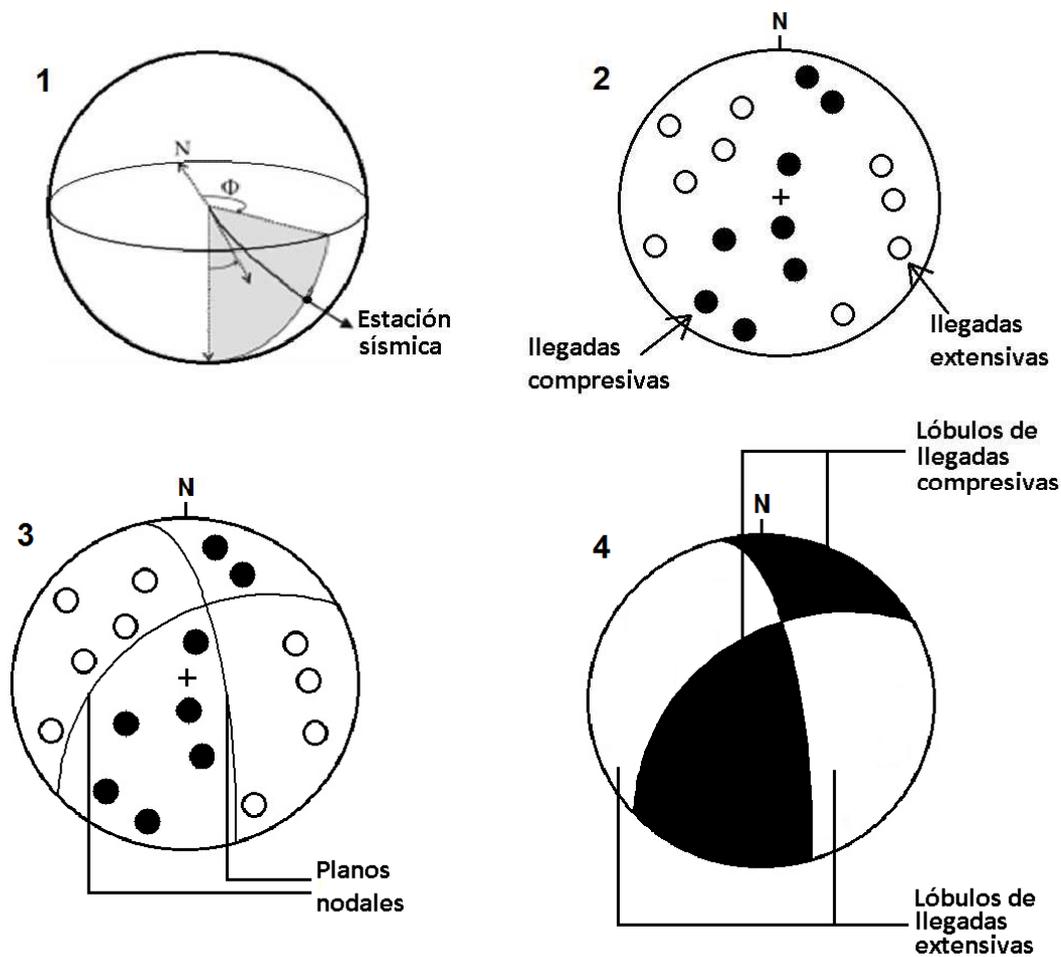


Figura 2.8. Pasos para la construcción de un mecanismo focal a partir de los primeros arribos de la onda P: (1) Registrar la información de la onda en cada estación (polaridad, ángulo de despegue del rayo, coordenadas de la estación). (2) En una red estereográfica desplegar la información proveniente de las distintas estaciones para un mismo evento sísmico. (3) Trazar los planos que separan las primeras llegadas extensivas y compresivas (planos nodales). (4) Demarcación de los campos de las primeras llegadas extensivas y compresivas para dar forma a la esfera focal.

Método del cociente de amplitudes S/P o de Hash

Típicamente el método usado para construir un mecanismo focal es mediante los primeros arribos de las ondas P pero las soluciones dependen del modelo de velocidades (un cambio de localización de un sismo puede inducir errores en el mecanismo focal), dependen de la ambigüedad en la identificación de los primeros arribos (por ejemplo cuando una señal es muy ruidosa que dificulte su lectura). Para abordar este problema se ha desarrollado otro método que determina mecanismos focales más estables.

Esta técnica fue desarrollada por Hardebeck y Shearer. Este método genera un conjunto de mecanismos aceptables para cada sismo teniendo en cuenta las diversas fuentes de incertidumbre, y devuelve el mecanismo más probable. Básicamente, el método consiste en utilizar los valores de las amplitudes de las fases P y S. Al hacer el cociente de amplitudes S/P es de esperarse que existan variaciones significativas ya que en el patrón de radiación la mayor cantidad de energía de las ondas P se encuentra cercana a los ejes T y P, para las ondas S la mayor cantidad de la energía se encuentra cercana a los planos nodales, una vez realizado el cociente S/P para varias estaciones se evalúa el logaritmo del cociente ($\text{Log}(S/P)$) y de un conjunto de mecanismos generados a partir de estos cocientes se escoge el que tenga la menor fuente de incertidumbre, es decir, aquel que minimice la dispersión del $\text{Log}(S/P)$.

Método de FPFIT

Para encontrar el modelo de la fuente, es decir la solución del plano de falla se usa un conjunto dado de observaciones del primer arribo de las polaridades del sismo ocurrido, estas observaciones son sometidas a una inversión que se realiza a través de un escenario en el cual se encuentra el modelo de minimización de una fuente normalizada. Dos factores de peso son incorporados en la minimización: uno reflejando la varianza estimada de los datos, y uno basado en el valor absoluto de la radiación de la amplitud de onda P (Aki & Richards, 1980). El programa encuentra el modelo de minimización de una fuente normalizada que más se ajusta considerando el error mínimo de cada una de las soluciones, este método únicamente es aplicable a eventos sísmicos que tengan seis o más polaridades de onda P leídas con claridad.

CAPÍTULO II

ASPECTOS TECTÓNICOS Y GEOLÓGICOS

Marco tectónico

La configuración actual del territorio mexicano ha sido consecuencia de procesos geodinámicos de larga duración que involucran a la interacción de un grupo de placas tectónicas principales y secundarias, que en nuestro caso son la Placa Norteamericana, Placa Del Pacífico, Placa del Caribe, Placa De Cocos y la Placa De Rivera (Figura 3.1). En la parte noroeste del país se tiene un límite tectónico de tipo lateral derecho entre las placas Del pacífico y Norteamericana lo que provoca un desplazamiento lento y continuo de la península de california en dirección noroeste a una velocidad de dispersión aproximada de 50 mm/año (De Mets, et. al. 1987; Antonelis, et. al. 1999) cuyo proceso comenzó hace aproximadamente 12 Ma, pasando transicionalmente de un ambiente de subducción de las placas Farallón y Guadalupe por debajo de la placa de Norteamérica a un ambiente de Rift después de los 5 Ma (Macías y Jiménez, 2012).

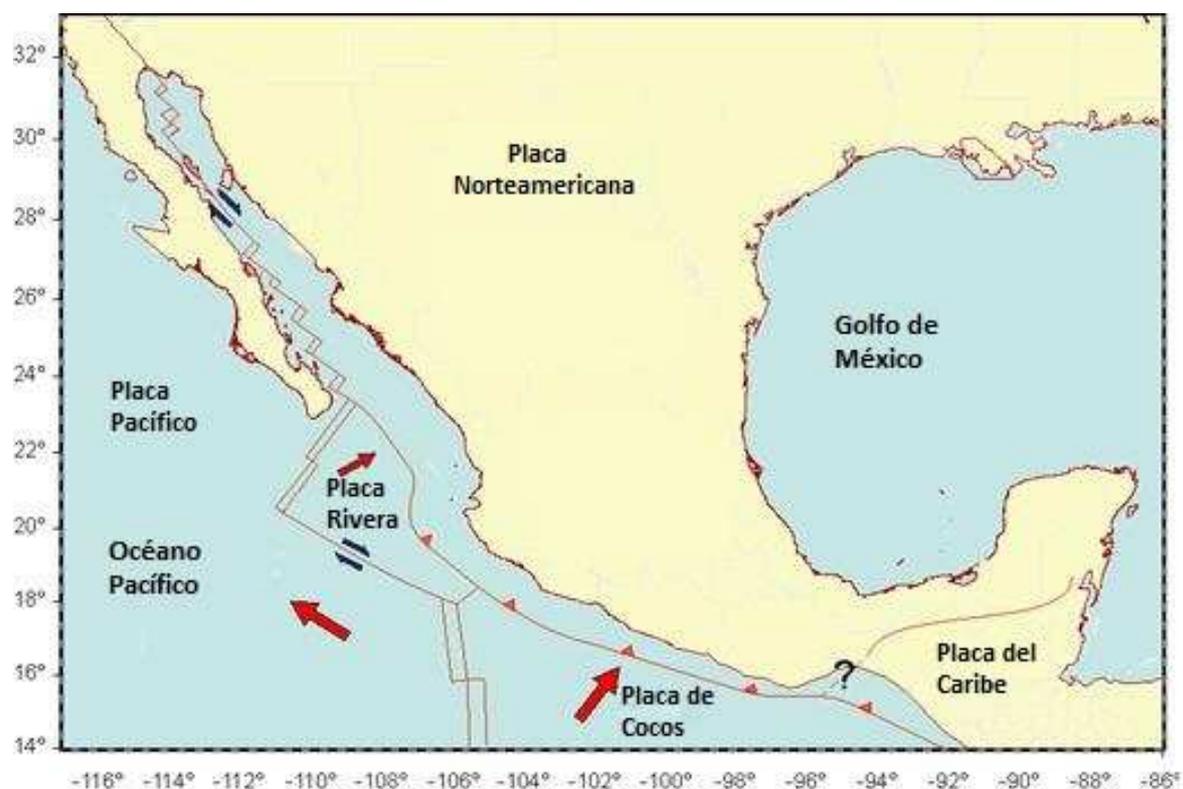


Figura 3.1. La configuración actual de México se debe al movimiento simultáneo de las cuatro placas tectónicas: la de Norteamérica, con desplazamiento hacia el suroccidente; la del Pacífico oriental, hacia el noroeste; la de Cocos, hacia el noreste, y la del Caribe, hacia el oriente franco (Tomada de www.ssn.unam.mx).

II. ASPECTOS TECTÓNICOS Y GEOLÓGICOS

Esta actividad tectónica ha dejado atrás un sistema de fallas transformantes con movimiento derecho (Fenby y Gastil, 1991) que se ubican dentro de la Provincia Extensional del Golfo, la cual se extiende desde el Norte de la península hasta la boca del Golfo de California, sus límites laterales son las Sierras Peninsulares de Baja California y la Sierra Madre Occidental, el sistema de fallas ha pasado por varias etapas relacionadas a cambios en la dirección del movimiento relativo y a la paulatina captura de Baja California por parte de la Placa del Pacífico. La dirección del eje del Rift tiene un rumbo aproximando de $N35^{\circ}W$, en tanto que la dirección de movimiento de la Placa del Pacífico es de $N56^{\circ}W \pm 3.2^{\circ}$ (Antonelis, et. al. 1999), lo cual cuantifica la oblicuidad del Rift entre 18° y 25° .

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 3.2). 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 Virgenes BCS.



Figura 3.2. Ubicación de la zona de estudio: El complejo volcánico de Tres Vírgenes en Baja California Sur (Google Earth).

Marco geológico

La geología en la zona de Tres Vírgenes ha sido estudiada por medio de trabajos realizados en la superficie y en el subsuelo gracias a métodos geofísicos que constan de análisis de información de pozo, métodos sísmicos magnéticos, eléctricos y electromagnéticos. Tanto la lito-estratigrafía como la estructura geológica del campo están fuertemente influenciadas por fallas y vulcanismo activo sobre un basamento cristalino de composición granítica que comenzó a formarse hace 99 millones de años durante el periodo Cretácico (65 – 136 Ma), el cual se conoce por cortes de pozo y por la aparición en rocas más recientes de xenolitos. Al basamento le sobreyacen rocas vulcano-sedimentarias del Mioceno (26 – 38 Ma) del Grupo Comondú (Andesita Santa Lucía), el Basalto La Esperanza (7.6 ± 1 Ma) y rocas volcánicas y epiclásticas del Plioceno Tardío (7 – 26 Ma) al Pleistoceno (2 – 7 Ma) de las calderas de Reforma (1.34-1.9 Ma) y El Aguajito (0.5-0.76 Ma). El complejo volcánico de Tres Vírgenes está formado por una caldera y tres edificios volcánicos alineados. Del más antiguo en el extremo noreste hacia el más reciente en dirección suroeste, se tienen: Caldera “El Aguajito”, Volcán “El Viejo”, Volcán “El Azufre” y el Volcán “La Virgen”. 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 volcán El Azufre se formó de la misma manera, mediante la destrucción de su domo central y el emplazamiento de flujos piroclásticos de bloques y cenizas a su alrededor y la emisión final de un nuevo domo central. La actividad volcánica migró sobre una fisura eruptiva con la formación de conos de escoria, hasta dar lugar al emplazamiento del volcán La Virgen, el más meridional y reciente de los tres. Este volcán se ha construido a través de la efusión de domos y lavas basáltico-andesíticas a dacíticas y muy pocas erupciones de tipo explosivo, una erupción pliniana (Pómez La Virgen) y otra de tipo vulcaniano (Mezquital). Las erupciones más recientes se han originado a través de varias fisuras en la cima del volcán y han fluido hacia sus flancos (Macías y Jiménez, 2012).

Geología estructural y Estratigrafía

Debido al régimen tectónico que predomina en el Golfo de Baja California se han desarrollado sistemas secundarios de fallas asociados a este límite tectónico, los cuales son identificados como sistemas conjugados laterales con componentes de tipo normal, muy frecuentes en la región geotérmica ya que se trata de un fallamiento lateral transtensivo (Figura 3.3), producto del movimiento entre las placas Pacífica y Norte Americana en el Golfo de California; el primer sistema se presenta paralelo a dicho límite con dirección NW-SE, dejando como resultado fallas de desplazamiento oblicuo de tipo lateral derecho con componente normal, y el segundo sistema casi ortogonal al primero con dirección NNE-SSW formando fallas también de desplazamiento oblicuo secundarias del tipo lateral izquierdo con componente normal. Esta componente es causada por el fallamiento lateral transtensivo, que crea esfuerzos de tensión alejando los bloques de roca entre sí (Macías y Jiménez, 2013).

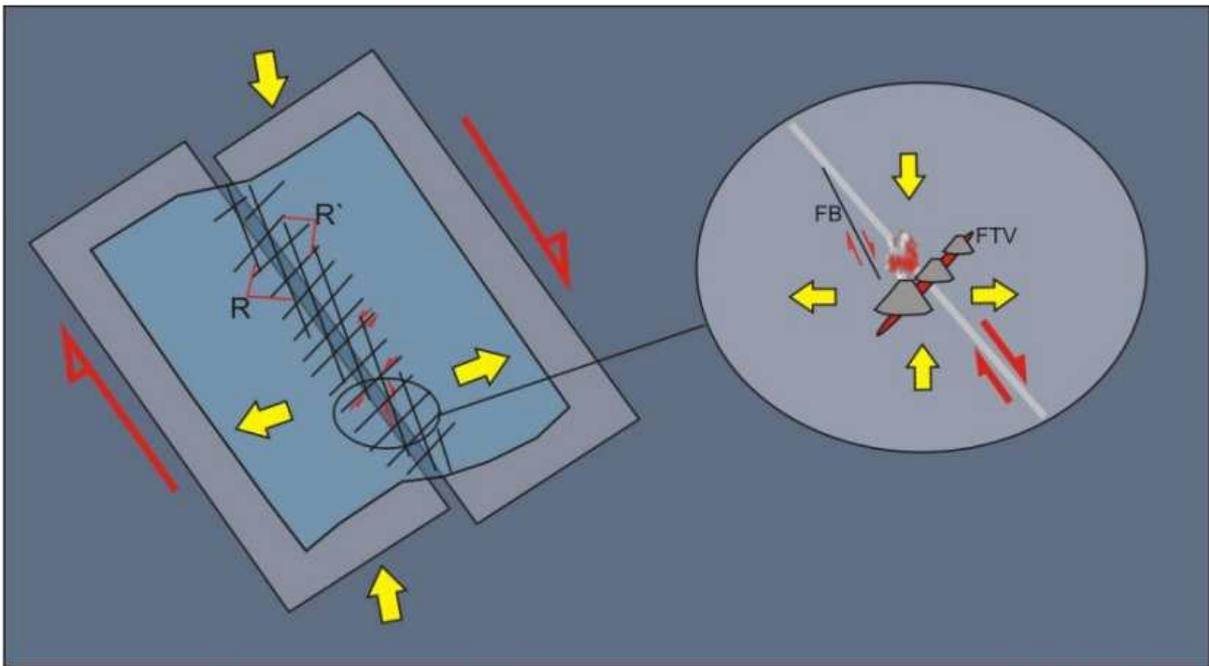


Figura 3.3.- Modelo de Fallamiento de Tres Vírgenes dentro del régimen tectónico lateral transtensivo (Tomada de Macías y Jiménez, 2013).

Dentro de los principales sistemas de fallas con orientación NW-SE se encuentra:

- 1.- El sistema “La Virgen” que se compone de una secuencia de fallas menores con un rumbo promedio $NW36^{\circ} \pm 5^{\circ}$ y su echado es al NE, se encuentra atravesando el volcán “La Virgen”, este sistema según los estudios previos ha presentado actividad sísmica importante misma que continúa hasta la fecha.

II. ASPECTOS TECTÓNICOS Y GEOLÓGICOS

2.- Atravesando el volcán “El Azufre” se encuentra la falla “El Volcán” que tiene un rumbo que varía de NW56°-59° con echado de 61° a 85° al NE y se encuentra activa en la actualidad.

3.- Continuando al NE y con una dirección casi paralela a esta falla se encuentran las fallas “El Viejo (1)” y “El Viejo (2)”, estas tienen un rumbo predominante que varía de NW41°- 56° con echado de 61° a 85° al NE, la falla “El Viejo (1)” se encuentra atravesando el volcán “El Viejo”, son fallas que están activas en la actualidad.

4.- Las fallas “El Volcán” y “El Viejo (2)” son conductoras de fluidos y temperatura, presentan permeabilidad y forman parte vital para la producción de vapor. Luego está la falla “El Partido” que tiene un rumbo promedio de NW43° con echado de 67° al NE, y por último del mismo grupo de fallas con orientación NW-SE la más alejada del campo geotérmico es la falla “El Azufre” la cual tiene un rumbo promedio de NW41° con echado de 68° al NE (Lorenzo y Soto, 2013).

Para el grupo de fallas con orientación NNE-SSW se tiene:

1.- El sistema de fallas “El Cimarrón” que tiene un rumbo NNW04° con echado de 84° al SW con inflexión a NNE03° y echado de 73° al NW, se encuentra atravesando la Caldera “El Aguajito”.

2.- El sistema “Las Víboras” tiene un rumbo promedio NNE06° con echado de 71° al SE, este sistema actualmente se encuentra activo y forma parte importante para el sector geotérmico, dicho sistema de fallas tiene en su porción sur un rumbo NNW04° con inflexión en su porción Norte a NNE05° (Lorenzo y Soto, 2013).

Estas fallas han sido localizadas en detalle en mapas, sobre todo en las áreas de manifestaciones termales, y en los pozos profundos del norte, aunque la mayor extensión de ambos sistemas de fallas está enterrada debajo de rocas volcánicas jóvenes. Consecuentemente, muchas de las trazas de fallas son inferidas (Figura 3.4).

El mayor desplazamiento en ambos sistemas de fallas ocurrió antes de la formación de Las Tres Vírgenes, y sólo pequeños movimientos han continuado en épocas más recientes. Algunos de estos desplazamientos cortan las Dacitas El Viejo, y quizás las rocas más jóvenes de los volcanes El Azufre y La Virgen. El sentido y magnitud del desplazamiento de las diferentes fallas es variable y no siempre bien conocido. Si bien los mapas de la geología superficial y los correspondientes cortes transversales no muestran estructuras importantes con tendencia NE-SW, interpretaciones de gravimetría han sugerido que la conexión tectónica entre la Falla El Azufre y la Falla La Virgen ha creado varias fallas

II. ASPECTOS TECTÓNICOS Y GEOLÓGICOS

con tendencia NE-SW que están enterradas debajo de la superficie volcánica. Probablemente estas fallas forman los linderos SE y NW del yacimiento geotérmico, también puede ser que hayan creado parte de la permeabilidad por fracturamiento dentro del yacimiento (CFE, 1998).

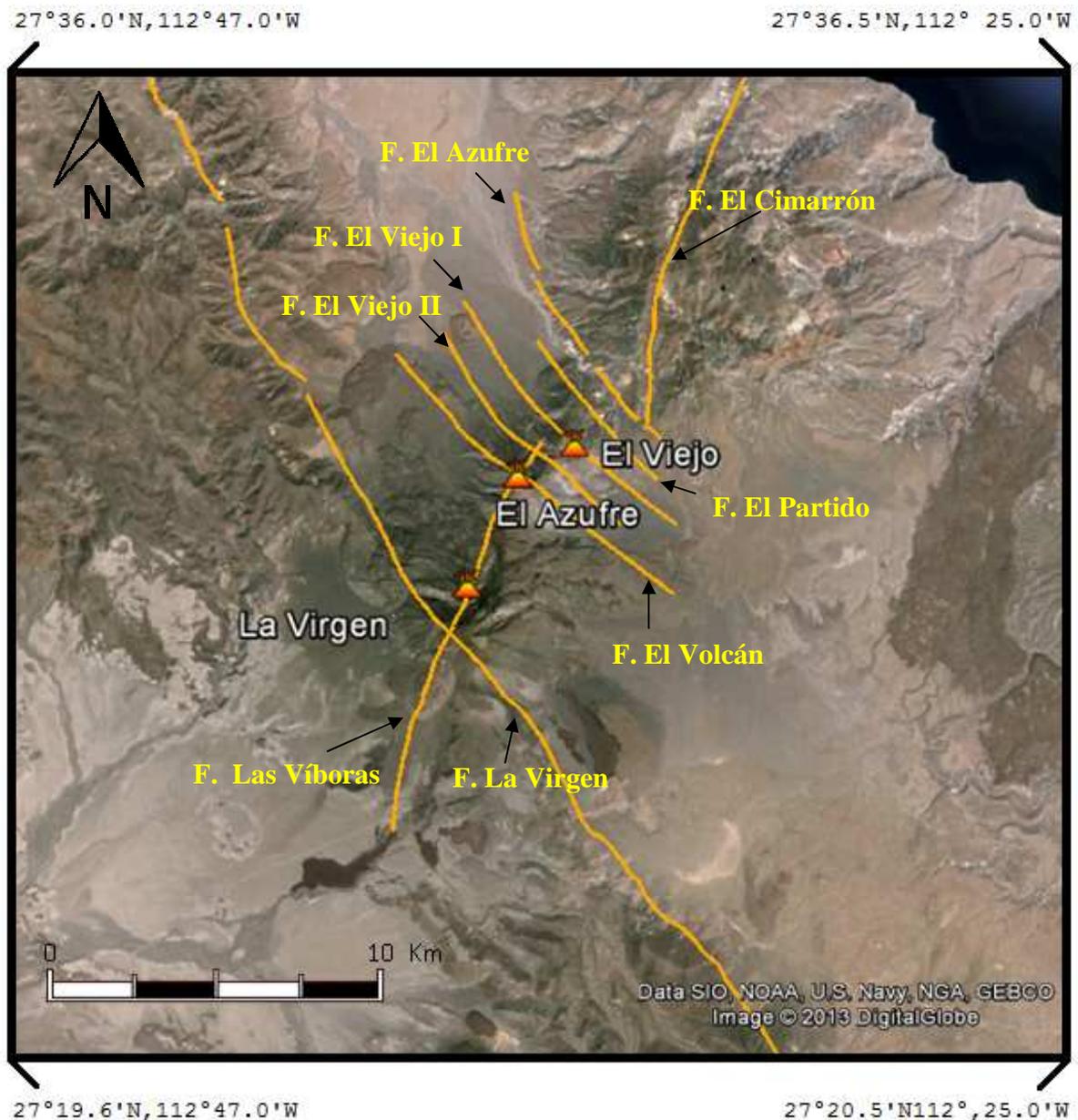


Figura 3.4. Mapa geológico estructural de la región geotérmica. Sistemas de fallas principales NW-SE, nombrados de N a S: Sistema El Azufre, Sistema El Partido, Sistema El Viejo (1), Sistema El Viejo (2), Sistema El Volcán y Sistema La Virgen. Sistemas de fallas principales NNE-SSW, nombrados de N a S: Sistema El Cimarrón y Sistema Las Víboras.

II. ASPECTOS TECTÓNICOS Y GEOLÓGICOS

En cuanto a su composición mineralógica, las rocas volcánicas del CVTV y de sus conos periféricos incluyen basaltos (olivino + clinopiroxeno + plagioclasas), andesitas basálticas (plagioclasas + clinopiroxenos + ortopiroxenos + olivino), andesitas (plagioclasas + ortopiroxenos + clinopiroxenos + hornblenda + cuarzo), y dacitas (plagioclasas + hornblenda + ortopiroxenos + clinopiroxenos + biotita + cuarzo). De acuerdo con su composición química se trata de rocas sub-alcalinas de tipo calco-alcalino y contenidos medios de potasio. Los magmas que las originaron fueron generados a profundidad habiéndose estacionado a unos 7 a 9 km por debajo del complejo volcánico, 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 (Macías y Jiménez, 2012).

Finalmente gracias al trabajo de campo y a la información obtenida por la perforación de los pozos se ha creado la columna estratigráfica generalizada del Complejo Volcánico de Tres Vírgenes (Figura 3.5).

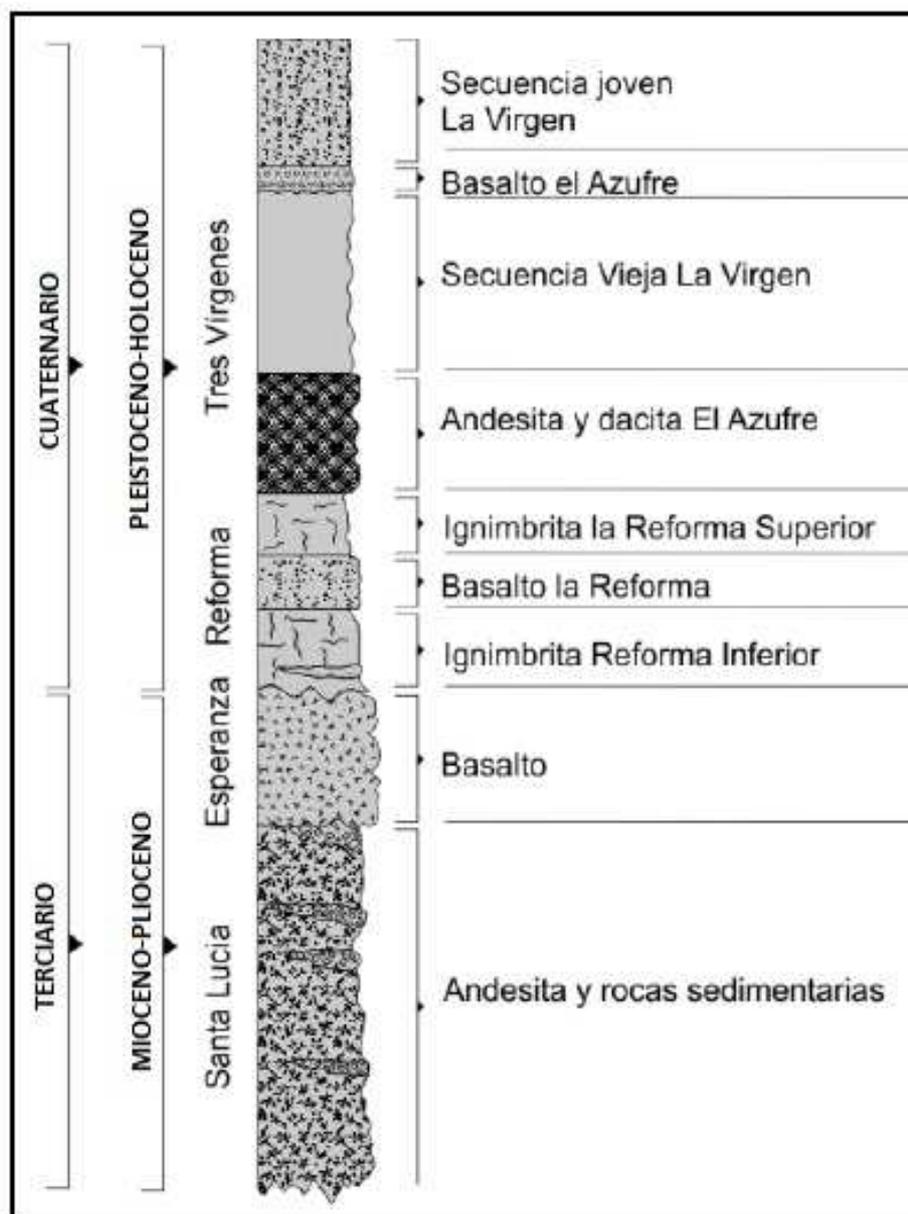


Figura 3.5. Columna estratigráfica generalizada del Complejo Volcánico de Tres Vírgenes (Macías y Jiménez, 2012).

CAPITULO III
SISMICIDAD DEL CAMPO GEOTÉRMICO

Monitoreo sísmico y operatividad de las estaciones

El campo geotérmico de Tres Vírgenes ha sido estudiado con mucho interés gracias a la instalación una red sísmica con estaciones temporales y permanentes alrededor de la esta zona para el monitoreo continuo de la sismicidad. Con el tiempo esta red sísmica ha sufrido cambios debido a la concentración de actividad sísmica en zonas preferenciales relacionadas con la geología del lugar. Durante el periodo de análisis de 2003 a 2012 la red sísmica fue evolucionando con el fin de mejorar la calidad de los datos y en consecuencia realizar un estudios cada vez más confiables, es por ello que cada estación fue evaluada y de ser necesario era sometida a un cambio de ubicación o de equipo, a continuación se muestra la descripción de la operatividad de las estaciones desde el año 2003 hasta el año 2012.

La red sísmica comenzó a funcionar en septiembre de 2003 con un total de 9 estaciones temporales y permanentes en su mayoría acelerómetros, posteriormente hubo un periodo de no registro en el año 2005; para mediados del año 2006 se presentó un periodo de monitoreo de 4 meses con una reinstalación de algunas estaciones e implantación de otras nuevas, tratando de incorporar a la red estaciones más sensibles a los eventos sísmicos (sismómetros de banda ancha); luego de un periodo de tiempo sin monitoreo del campo geotérmico para mayo del 2008 se continuó con el monitoreo constante del campo sustituyendo cada vez más acelerómetros por sismómetros para una mayor resolución de los datos, terminando el periodo de registro en diciembre de 2008. A principios de marzo de 2009 se restableció el registro de eventos sísmicos con una red casi en su totalidad compuesta por sensores de banda ancha, para comienzos del 2011 se definió la red sísmica conformada en su totalidad por sismómetros para una mayor calidad en la lectura de los datos. Para el último periodo de registro en mayo de 2012 se instaló una estación más para tener una mayor cobertura de eventos sísmicos (Figura 4.1).

III. SISMICIDAD DEL CAMPO GEOTÉRMICO

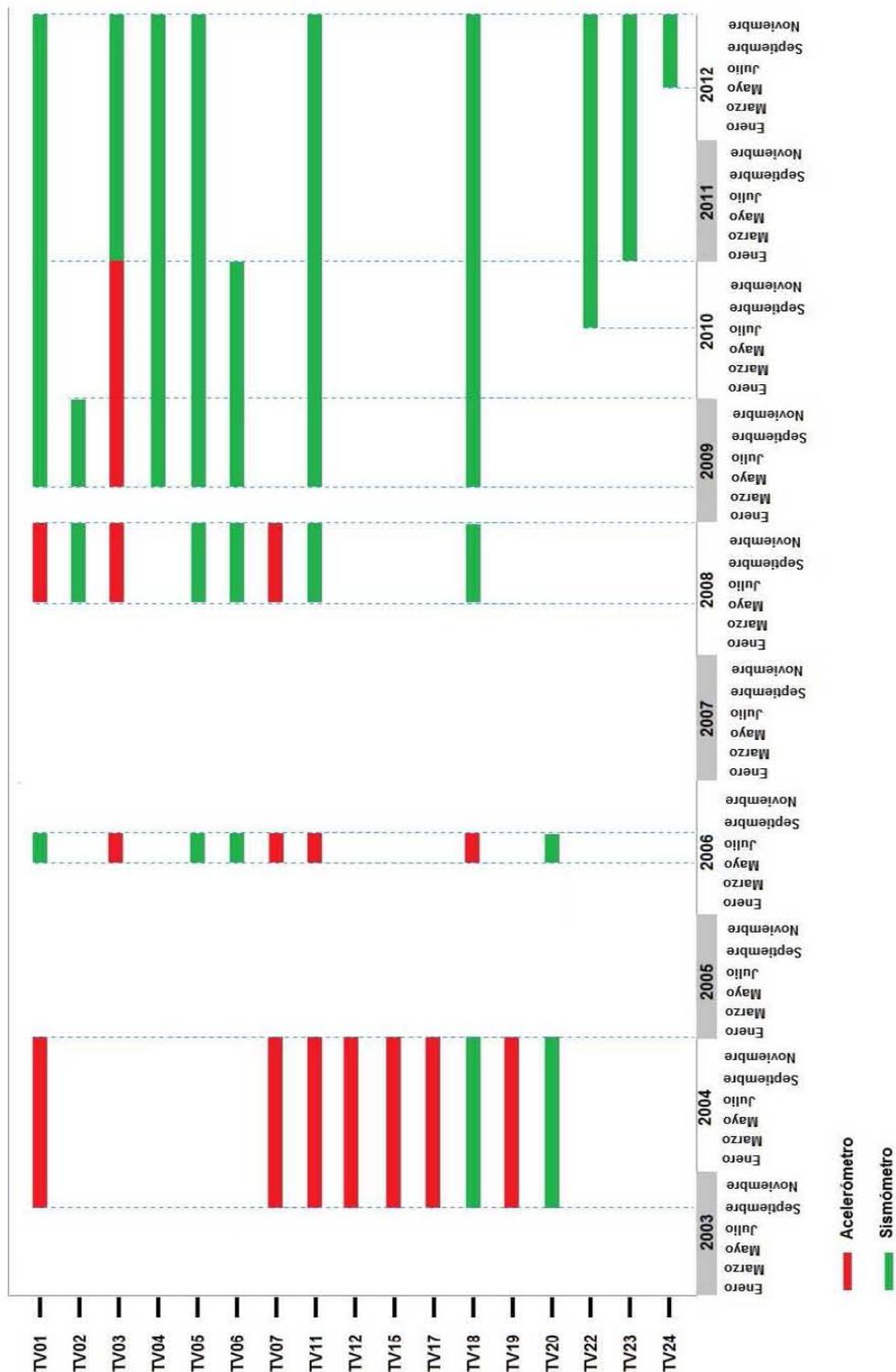


Figura 4.1. Operatividad de la red sísmica desde 2003 a 2012. Los espacios en blanco significan la no operatividad o interrupción del registro de datos. Como puede observarse, en cada periodo se ocurrieron cambios en las estaciones con el fin de instalar nuevos aparatos para sustituir a los acelerómetros por sismómetros o para reubicar las estaciones.

III. SISMICIDAD DEL CAMPO GEOTÉRMICO

En la Figura 4.2 se muestra la ubicación de las estaciones de la red sísmica, las estaciones en color azul son las que actualmente se encuentran en operación, las de color rojo fueron sustituidas o reubicadas.

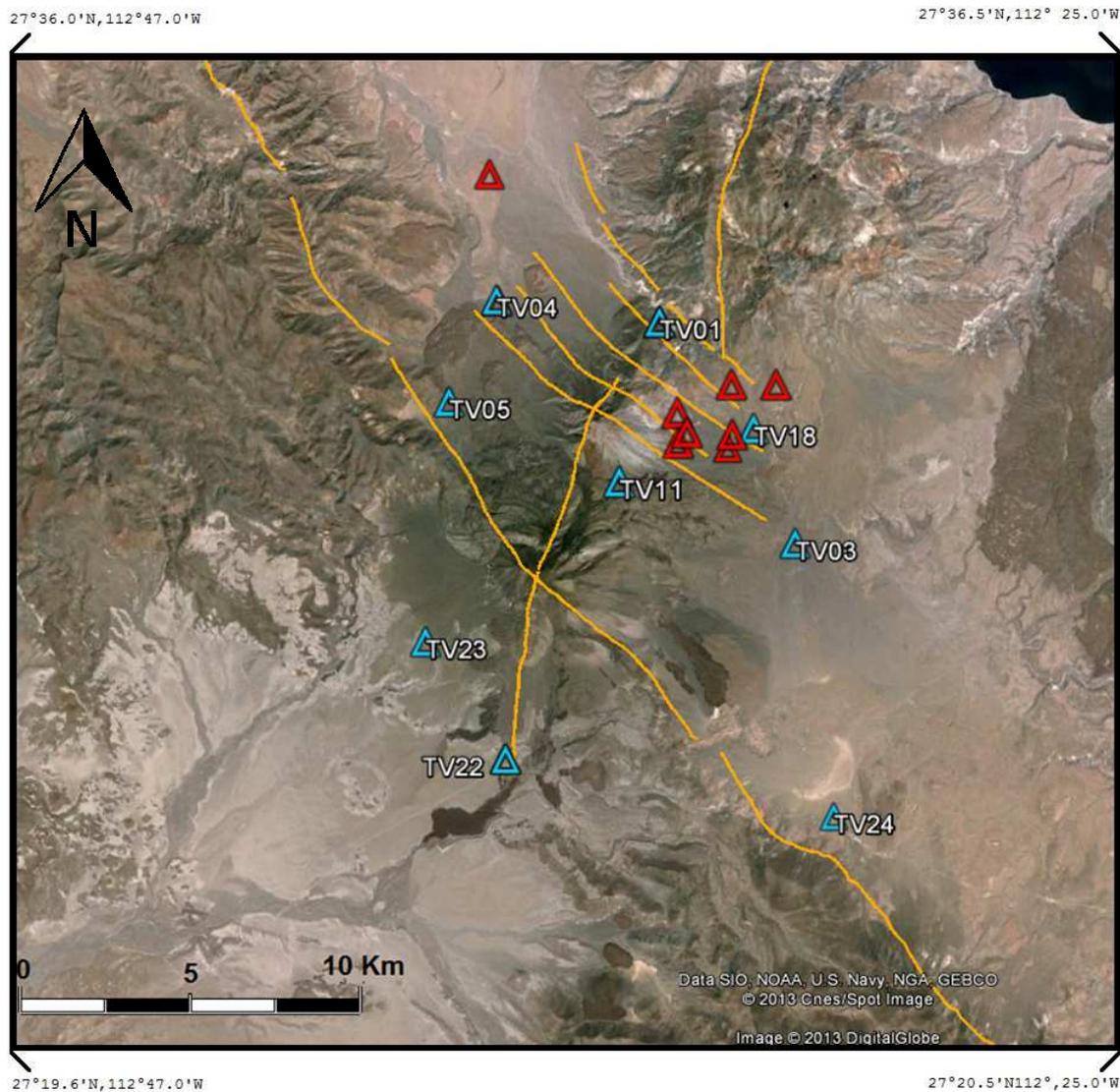


Figura 4.2. Distribución de la red sísmica. Los triángulos representan las estaciones sísmicas, y las líneas naranja representan las principales fallas del complejo volcánico.

Periodos de registro de datos

A partir de los estudios realizados por Lermo et al., 2003-2011 se ha realizado una recopilación de eventos sísmicos localizados los cuales se han presentado en trabajos anteriores, esta recopilación de eventos se divide en cinco periodos de registro, al concluir cada periodo se realizó un informe técnico

III. SISMICIDAD DEL CAMPO GEOTÉRMICO

con el fin de mostrar los eventos localizados y conocer la actividad sísmica relacionada y no relacionada con la operación de los pozos de la planta geotermoeléctrica.

Periodo 1: Del 27 de septiembre (inicio de la estimulación ácida del pozo LV-13) al 23 de diciembre del 2004. Se registraron en una estación de referencia un total de 174 sismos locales, 131 sismos regionales y muchos más señales de tipo volcánico, durante el monitoreo de la estimulación de un pozo inyector. Sin embargo solo localizaron un total de 37 sismos a profundidades del orden de 0.4 a 4 km y magnitudes pequeñas típicas de sismos locales entre 0.7 y 2.2 Mc (Lermo et al., 2004).

Periodo 2: De mayo a agosto de 2006. Se registraron 55 sismos locales, 32 sismos regionales y muchos más señales de tipo volcánico y sólo se localizaron un total de 23 sismos a profundidades del orden de 1.0 a 8 km y magnitudes pequeñas de sismos locales entre 1.3 y 1.6 Mc (Lermo et al., 2006).

Periodo 3: De abril a octubre de 2008. En total en este periodo se pudo reconocer 241 son sismos locales, 83 tremores armónicos y 35 regionales pero sólo se pudieron localizar 13 sismos locales con magnitudes entre 0.4 y 2.0 Mc, mientras que la profundidad de los mismos se agrupa principalmente desde 0.3 hasta los 15 km; la escasa localización de sismos radica principalmente, en la necesidad de tener el mismo evento en más de tres estaciones sísmicas, y dado que en ese entonces cinco sismómetros no trabajaron por completo por problemas de tiempo, de alimentación de la batería, por la antigüedad de los instrumentos o por la magnitud tan pequeña de estos sismos locales la señal se atenuó antes de llegar a las estaciones más distantes (Lermo et al., 2004).

Periodo 4: de abril 2009 a noviembre 2010. Se registraron 1920 sismos locales, 1038 sismos regionales, 140 sismos lejanos y 30 tremores, cuya distribución en el tiempo para los sismos locales y regionales, presenta un aumento para los meses de noviembre-diciembre del 2009, así como también para los meses de abril-mayo y julio-agosto-septiembre del 2010. La mayoría de los locales están asociados a las actividades de la perforación, acidificación, pruebas de válvulas y producción del pozo LV06, mientras que los regionales están asociados a las réplicas del terremoto de Mexicali del 4 de abril del 2010 ($M_w=7.2$), conocido como el temblor El mayor-Cucupah. Y de estos se pudo determinar sus parámetros hipocentrales a 331 sismos locales, que presentan magnitudes Mc entre 0.1 y 3.2 y profundidades desde 0.6 hasta los 12 km (Lermo et al., 2010).

Periodo 5: De diciembre 2010 a noviembre del 2011. Se identificaron 650 sismos locales de los cuales se pudo determinar sus parámetros de localización para 217 sismos con magnitudes Mc entre 0.1 y 2.9, mientras que la profundidad de los mismos se agrupa principalmente desde 1.5 hasta los 11 km (Lermo et al., 2011).

Distribución de la sismicidad

De la información recopilada durante el periodo de 2003 a 2011 se utilizarán sólo los eventos locales a los cuales se les ha obtenido sus parámetros hipocentrales, en total se tienen 621 sismos, estos eventos no se originan de manera aleatoria, es decir, existen zonas de máxima actividad sísmica que se relaciona con la geología interna del campo geotérmico y con la ubicación de los pozos (Figura 4.3). En la parte norte del complejo volcánico donde se encuentra la calderada de El Aguajito se aprecia un conjunto de sismos esparcidos entre las fallas El Cimarrón y El Azufre, en la parte media donde se encuentran los tres volcanes que dan su nombre al complejo puede notarse una fuerte concentración de sismos la cual tiene la mayor cobertura de las estaciones y en la parte sur del complejo a la derecha de la falla La Virgen se aprecia una gran cantidad de sismos aunque estos no muestren una alineación preferencial.

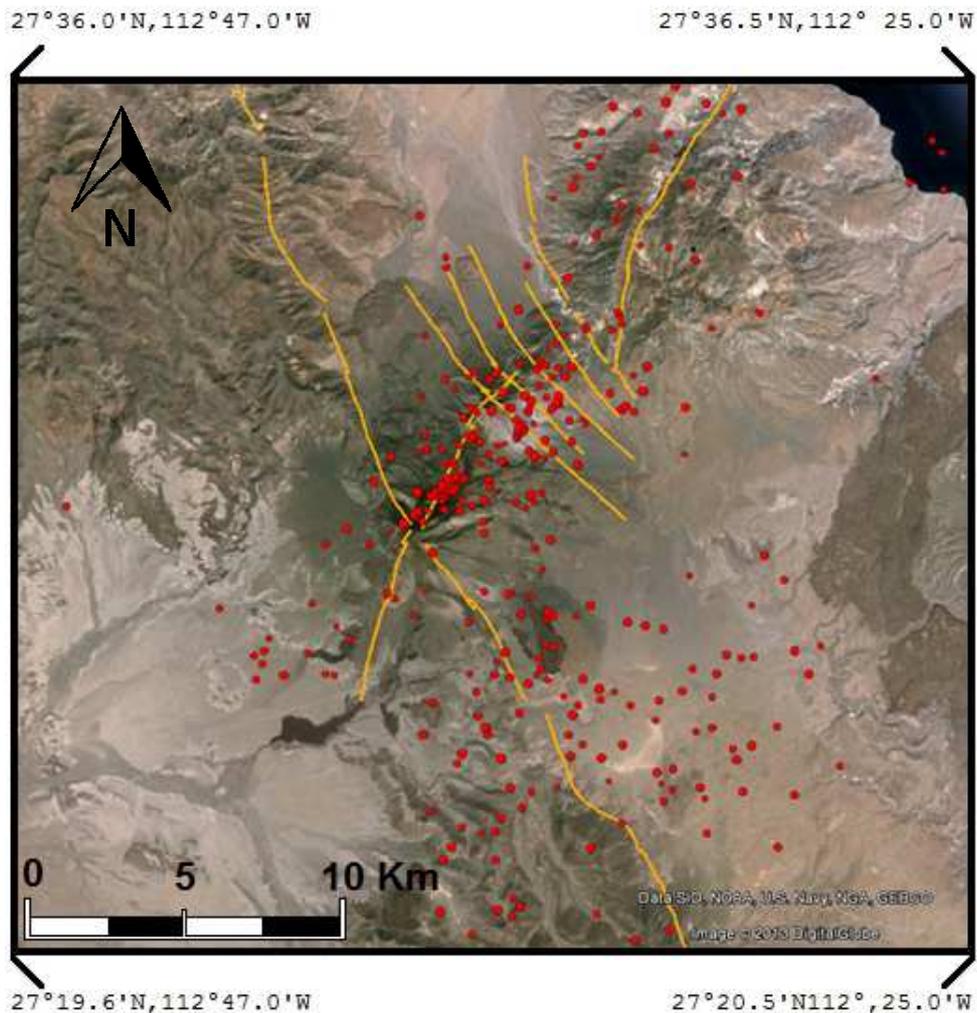


Figura 4.3. Distribución de los 621 sismos localizados desde año 2003 hasta el 2011.

III. SISMICIDAD DEL CAMPO GEOTÉRMICO

La distribución de la sismicidad también puede observarse en profundidad por medio de unos cortes de sección mostrados en las figuras 4.4 y 4.5.

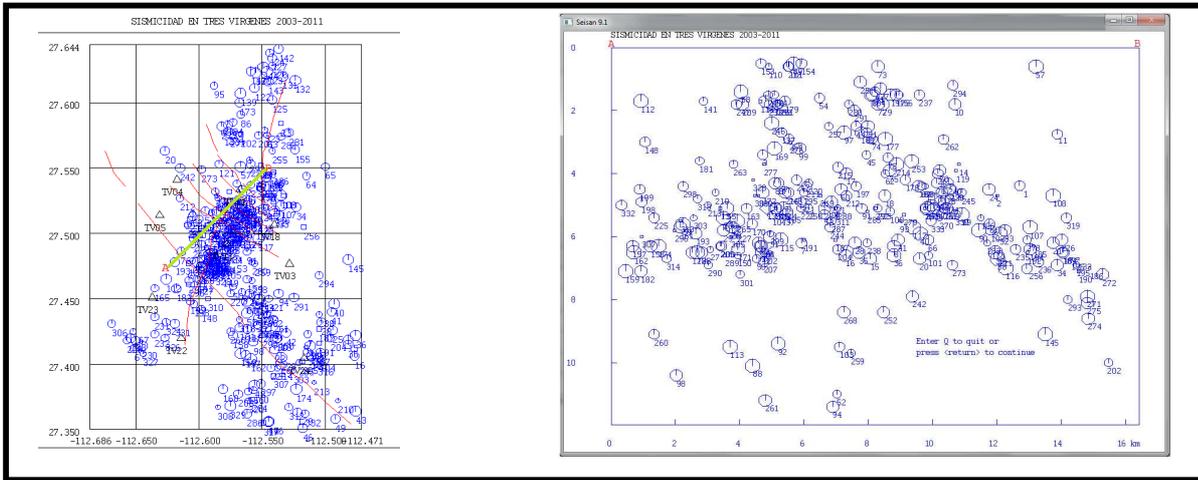


Figura 4.3. Sección en profundidad del perfil A-B orientado NE-SW.

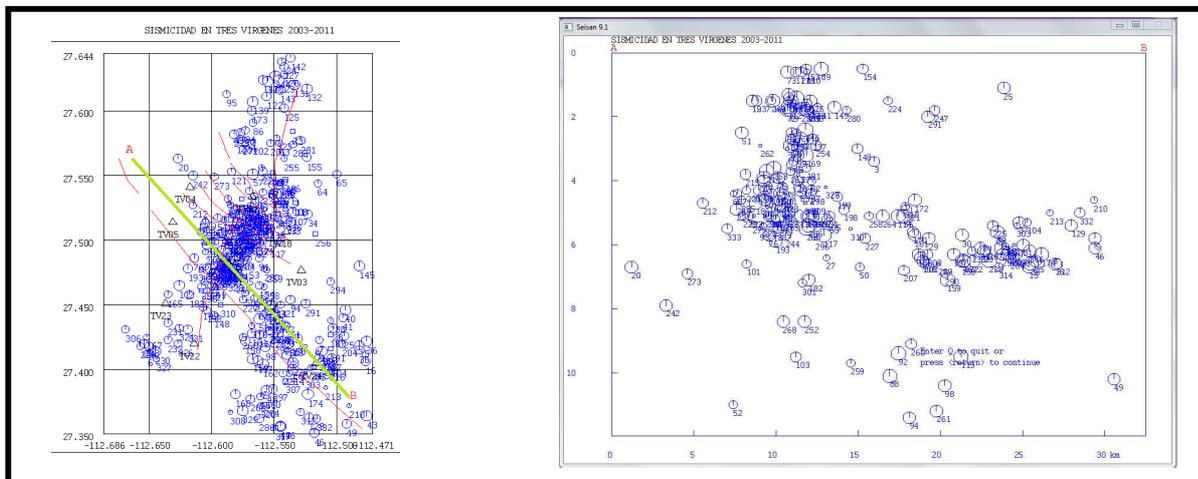


Figura 4.3. Sección en profundidad del perfil A-B orientado NW-SE.

Para los eventos utilizados en el periodo de diciembre 2011 a diciembre 2012 aún no se ha realizado un informe técnico, es por ello que para la recopilación de los eventos ocurridos en este periodo se tuvo que realizar un proceso de identificación y localización (a partir de los datos en crudo) que se describe en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO DE DATOS

Software utilizado

El sistema SEISAN es un software para el análisis sísmico que utiliza la información de los registros de una red sísmica disponible, y la información geológica de la región de estudio. Con SEISAN es posible utilizar los eventos sísmicos locales para introducir manualmente las lecturas de fase o recogerlos con un cursor, situar los acontecimientos, editar eventos, determinar los parámetros espectrales, momento sísmico, el azimut de la llegada de las estaciones de tres componentes y los epicentros de trazado y para diversos análisis de parámetros de la fuente (Versión 9.1 Havskov-Ottmøller, 2012). Para comenzar con el uso del software se requieren las formas de onda de cada señal sísmica almacenada por las estaciones, la información de las estaciones (coordenadas, características del sensor y del registrador), los atributos sísmicos propios de la región donde ocurren los eventos (el modelo de velocidades de onda del subsuelo, la relación de velocidad V_p/V_s y las ecuaciones pertinentes para el cálculo de la magnitud del sismo).

Relación de velocidad V_p/V_s

Mediante el uso de los tiempos de llegada de las ondas P y S y la diferencia entre ellas, es posible construir la curva de Wadati (1933), la cual sirve para obtener la pendiente del ajuste lineal que indica la relación de velocidades (V_p/V_s), a partir de este cociente de las velocidades de ondas compresionales P entre las ondas transversales S se puede obtener el coeficiente de Poisson (σ) que es una de las constantes elásticas de los materiales, de esta manera se pueden conocer las propiedades mecánicas del medio. Para este trabajo se obtuvo la relación de velocidades de 1.72 a partir del promedio total de la relación V_p/V_s de cada uno los eventos localizados.

Modelo de velocidades

El modelo de velocidades que se usó en este en este trabajo ha sido utilizado desde hace ya varios años para diferentes estudios el cual ha sido modificado del propuesto por Rodríguez et al., (2000). La siguiente tabla muestra las velocidades de la onda P con su respectiva profundidad.

Vp (km/s)	Prof. (km)
1.24	0.00
2.31	0.25
3.00	0.50
4.50	1.52
6.30	7.00
7.60	11.0
8.20	25.00

Tabla 1. Modelo de Velocidades de onda P a diferentes profundidades del subsuelo.

Ecuación para el cálculo de la magnitud

La ecuación utilizada en este trabajo para la obtención de la magnitud es la propuesta por Havskov y Macías (1983). Aun cuando existen relaciones para zonas geotérmicas de México (Chavacán et al., 2007) se utilizó la relación de Havskov y Macías porque se requiere una comparación con la sismicidad del golfo determinada por el SSN quienes utilizan esta relación para sismos pequeños.

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

Donde **M_c** es la magnitud de coda, **T** la duración total de la coda en segundos y **D** la distancia epicentral en Km.

Localización hipocentral y selección de eventos

Una vez establecidos los parámetros para el procesamiento sísmico, se describe a continuación el procedimiento que se siguió para la localización hipocentral de los sismos ocurridos en 2012 a partir de los datos en crudo, de esta manera se completa la base de datos a utilizar para la selección de los eventos que servirán para la estimación del campo de esfuerzos.

IV. PROCESAMIENTO DE DATOS

Inicialmente se requieren los datos provistos directamente del registrador los cuales son guardados en formato Guralp. Una vez recopilada toda la información sísmica del periodo de registro (Noviembre 2011 a Diciembre 2012) se procede con la identificación de los eventos sísmicos, para ello se requiere desplegar los registros en forma de “tambor sísmico” (Figura 5.1) el cual muestra en una interfaz gráfica el sismograma de un día entero, una vez identificados los eventos en el tambor se aíslan y se guardan para analizarlos simultáneamente con la misma señal de las diferentes estaciones.

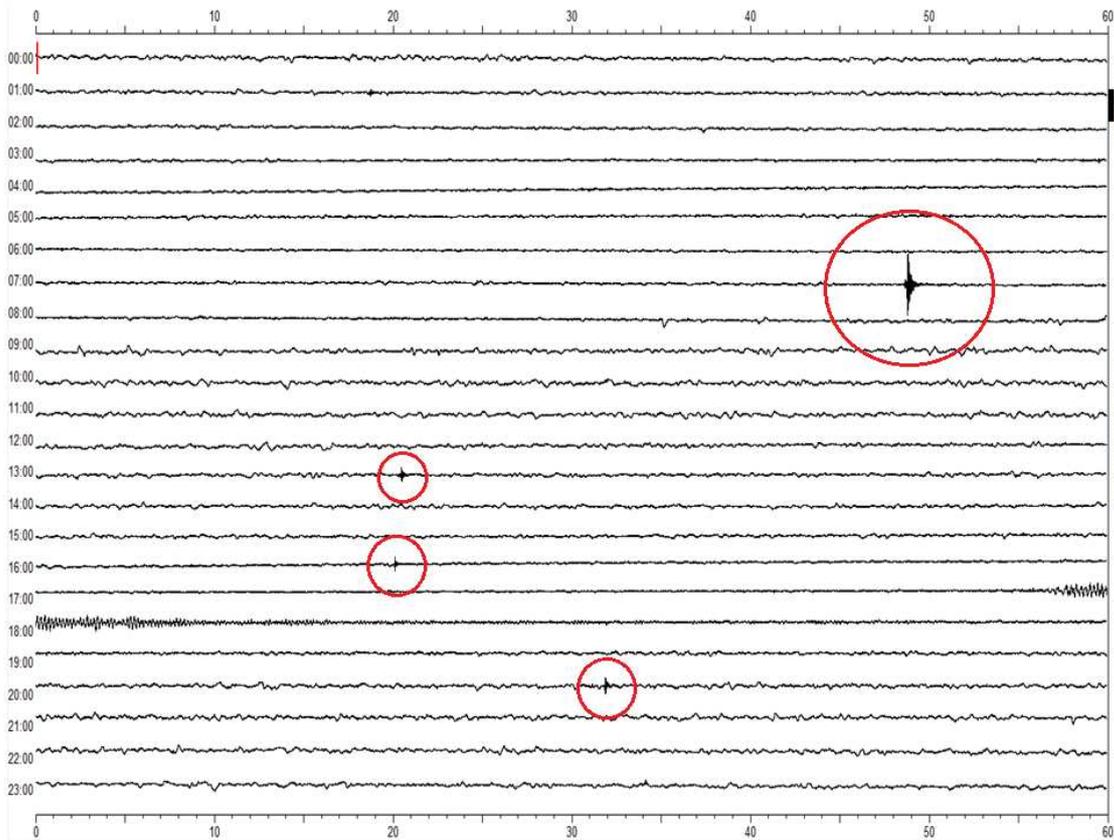


Figura 5.1. Tambor de la estación TV01. Se han encerrado en círculos rojos los eventos identificados para su posterior procesamiento.

Después se analizan cada una de esas señales identificadas para calcular la diferencia de tiempos de arribo de las onda P y S y asignar el tipo de evento sísmico, ya sea local, regional o distante (hasta 4 segundos de S-P evento sísmico local, hasta 12 segundos evento regional y después de 12 segundos evento distante o telesismo. Ver Figura 5.2). Únicamente se seleccionan los eventos locales con una duración de s-p menor a 4 segundos, que nos indica que ocurren dentro de la región geotérmica.

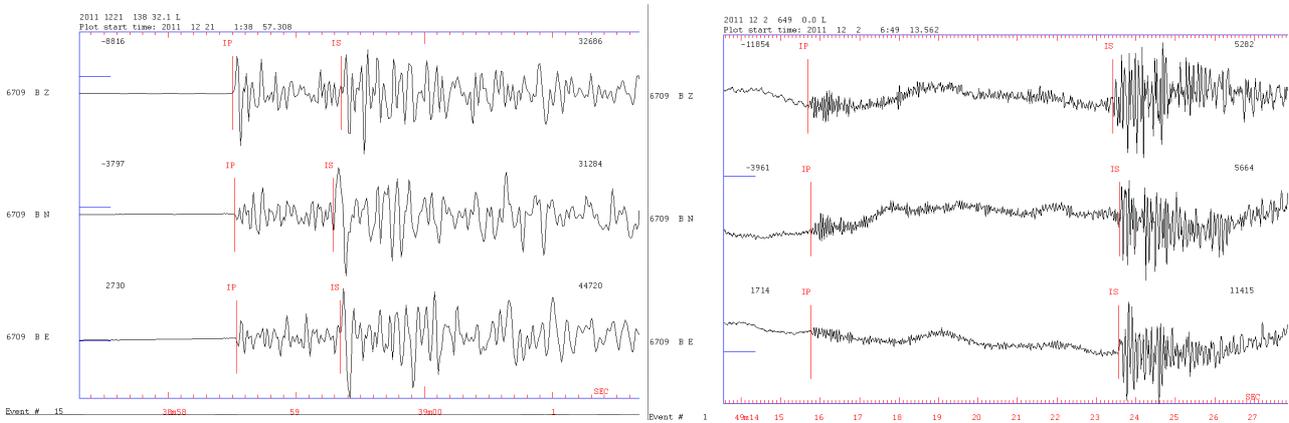


Figura 5.2. Evento local y regional.

En este periodo de registro se identificaron 652 eventos locales de los cuales sólo se localizarán aquellos que sean útiles para estimar el campo de esfuerzos, es por ello que a partir de este punto se necesita realizar una selección de eventos con el fin de reducir los datos a una zona de estudio específica y elevar la calidad de los resultados, es así que se realizará una relocalización de los eventos locales recopilados del periodo 2003-2011 y una primer localización de los eventos para el periodo de 2012 que cumplan con ciertas características.

Tras juntar toda la información disponible para el proceso de relocalización y localización de eventos (periodo 2003-2011 y periodo 2012 respectivamente) se establece una serie de criterios de selección de eventos ya que no todos cumplían con las características mínimas necesarias para su posterior procesamiento, estos criterios de selección se basaron en los requerimientos mínimos necesarios para la construcción de mecanismos focales y por lo tanto obtener el estado de esfuerzos, dichos criterios consistieron de:

- Eventos localizados en más de 4 estaciones.
- Que la lectura de las fases P y S pueda apreciarse con claridad al igual que la polaridad de la onda P.
- Que hayan ocurrido dentro de la cobertura de la red sísmica o aparentemente cercanos a las fallas reconocidas.
- Con un error de localización rms menor a 0.1 y un error en latitud, longitud y profundidad menor a 2.5 Km.

IV. PROCESAMIENTO DE DATOS

Inicialmente se desecharon aquellos eventos que fueron detectados por menos de 4 estaciones sísmicas. De los 1273 eventos locales (621 del periodo 2003-2011 y 652 del periodo 2012), 1129 fueron identificados por 4 o más estaciones.

Para continuar con la selección se han conservado aquellos eventos con una polaridad de onda P que sea claramente reconocible e impulsiva (Figura 5.3) ya que es de otra manera no sería posible la construcción de mecanismos focales, de los 1129 eventos restantes sólo 279 cuentan con un arribo de onda P clara e impulsiva en 4 estaciones como mínimo.

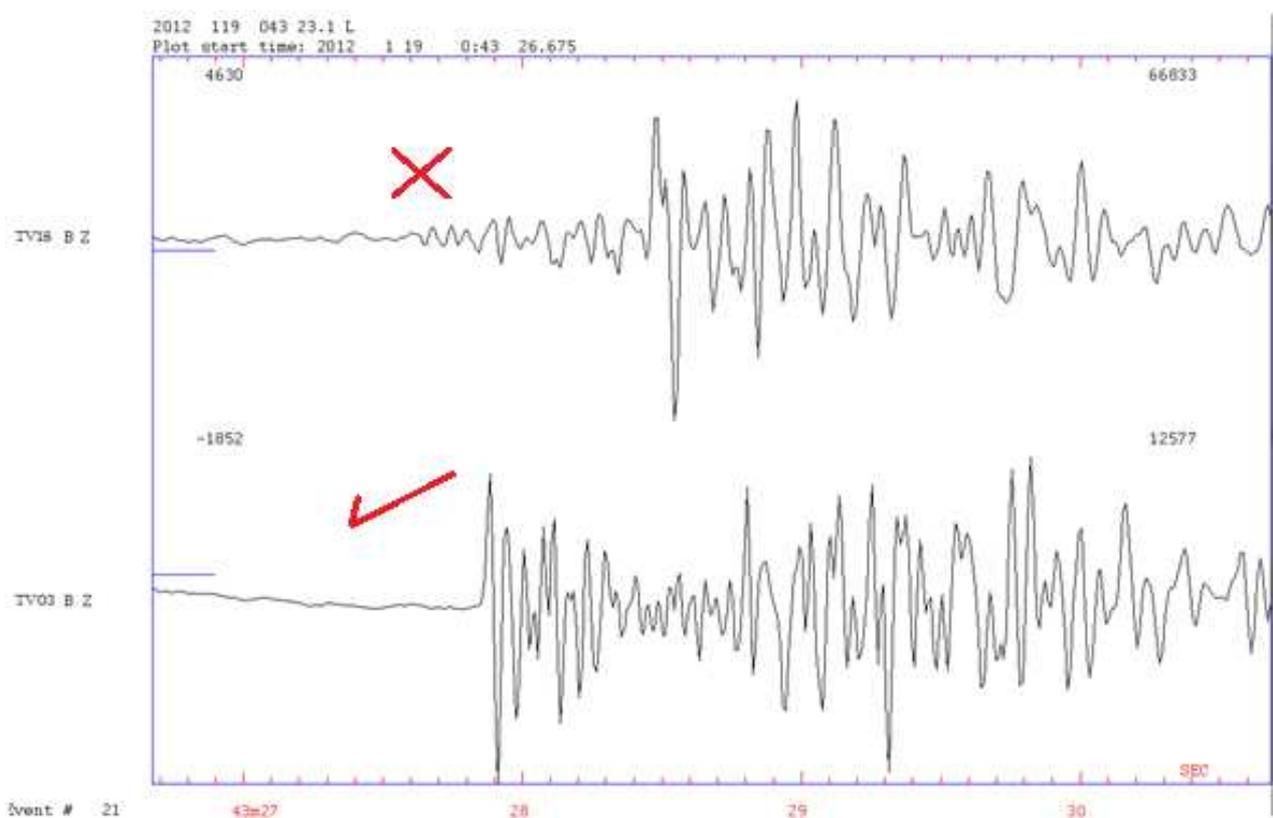


Figura 5.3. Polaridades de onda P. Como puede observarse, en la estación TV03 se aprecia perfectamente el arribo de la onda P con una polaridad hacia arriba, mientras que en la estación TV18 el arribo de la onda P no define su polaridad con claridad.

El siguiente paso es establecer 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, de esta manera aumentará la precisión en la localización de los sismos seleccionados.

Para localizar un sismo 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. Si 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 (Figura 5.4).

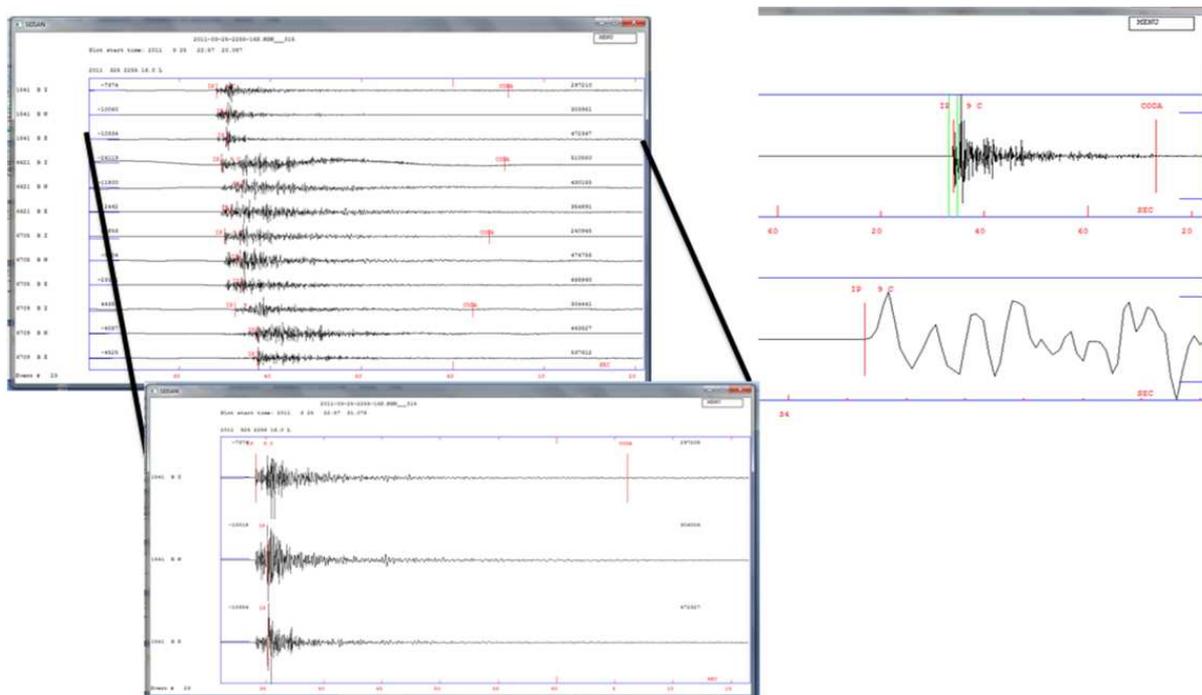


Figura 5.4. Localización de un sismo con SEISAN.

Luego de hacer una localización preliminar para los 217 eventos restantes se graficaron los sismos y se desecharon aquellos que se ubicaron fuera de la zona de tolerancia. En la Figura 5.5 se muestra sombreada la zona de estudio donde se sólo tomaran en cuenta los sismos que se encuentren dentro de ella. El perímetro de esta zona de estudio fue definido conforme al terreno delimitado por las estaciones de la red sísmica, es decir, la zona de mayor cobertura azimutal.

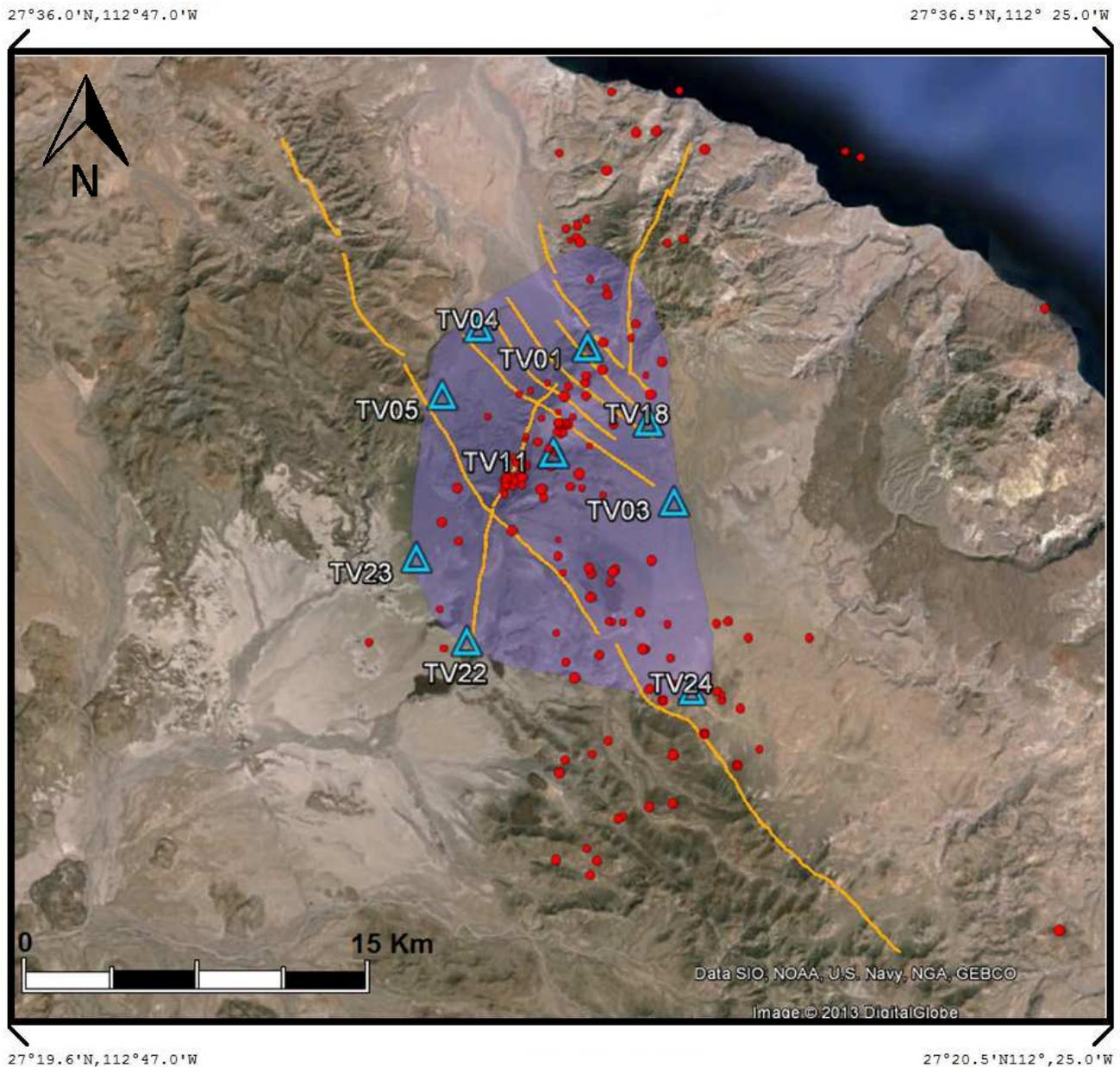


Figura 5.5. Zona de estudio sombreada en color morado, los sismos que se encuentran fuera de la zona de cobertura se desecharon.

Al final quedaron 150 sismos los cuales cumplen con los criterios de calidad de señal, ubicación y claridad en lectura de fases P y S. sin embargo es necesario relocalizar estos eventos restantes para reducir al mínimo el error de localización y ajuste de tiempos de llegada los cuales según los criterios deben ser rms menor a 0.1 y error en latitud, longitud y profundidad menor a 2.5 km. En total se han seleccionado 78 sismos que cumplen con los criterios antes mencionados, localizados a profundidades

que varían entre los 2 y 10 Km y con magnitudes de entre 0.5 y 3 Mc (Figura 5.6). A partir de este resultado se puede obtener los mecanismos focales para su posterior interpretación.

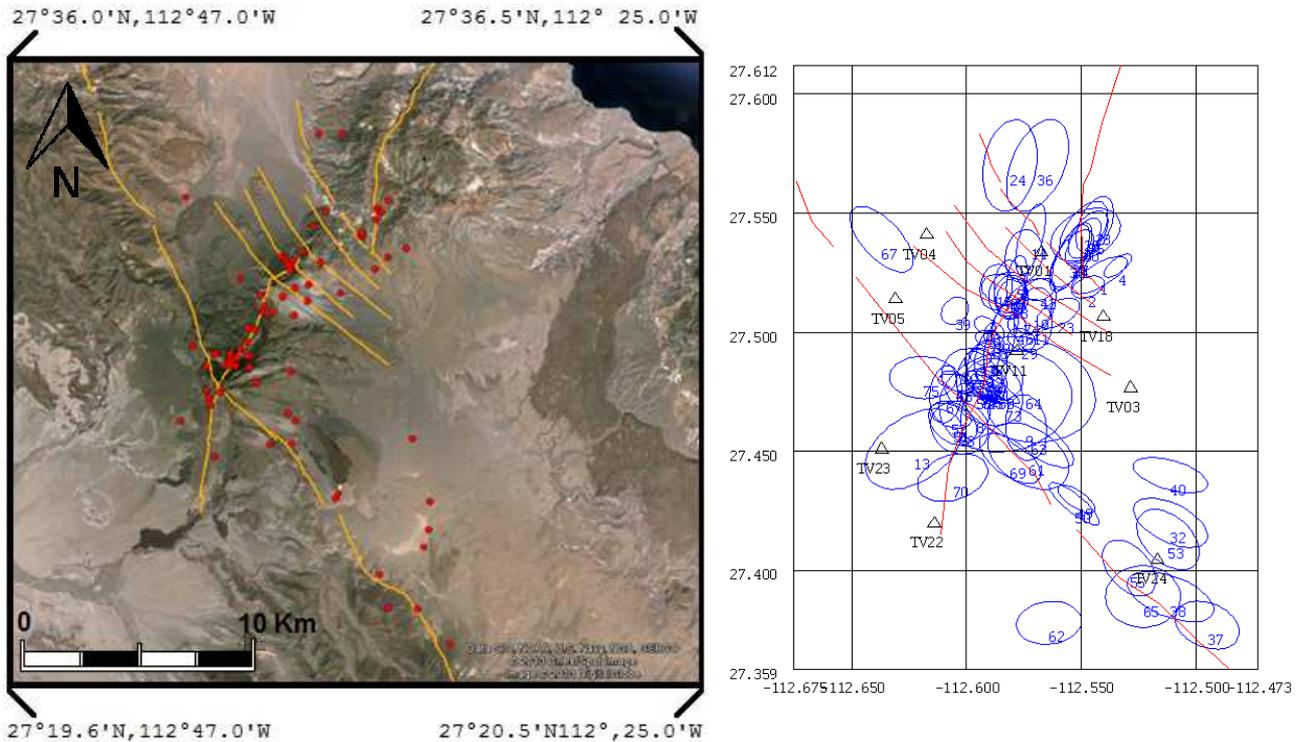


Figura 5.6. Izquierda: Distribución de los eventos seleccionados para el estudio. Como puede observarse los sismos se concentran en zonas preferenciales asociados a las fallas activas del campo, estos eventos nos revelarán la naturaleza de la configuración geológico-estructural más representativa del complejo volcánico. Derecha: Elipses de error de los sismos seleccionados

Obtención de Mecanismos Focales

Debido a que la construcción de un mecanismo focal requiere de un gran número de estaciones sísmicas para aumentar la certidumbre del diseño de los planos nodales y ya que en este estudio se cuenta con una red sísmica limitada a poco menos de 10 estaciones, se utilizaron tres métodos diferentes para la elaboración de los mecanismos (dependiendo de la disponibilidad de elementos de cada evento). Se obtuvieron los mecanismos focales simples de cada uno de los 78 eventos seleccionados mediante el método de primeros arribos (FOCMEC) y por el método de cocientes de amplitudes (HASH) se construyeron los mecanismos focales con las polaridades desde 4 hasta 8 estaciones sísmicas. Y por último se construyeron los mecanismos focales mediante el método de FPFIT únicamente para algunos eventos ya que este método requiere de un mínimo de 6 polaridades leídas de onda P para poder operar. En la figura 5.7 se muestra un ejemplo del sismograma de un

evento al cual se le ha estimado su mecanismo focal mediante los 3 métodos, en la figura 5.8 se muestran las diferentes soluciones y los parámetros del plano nodal seleccionado; se indican en la parte superior de las figuras la hora del evento, las coordenadas de localización, la profundidad en Km y la magnitud.

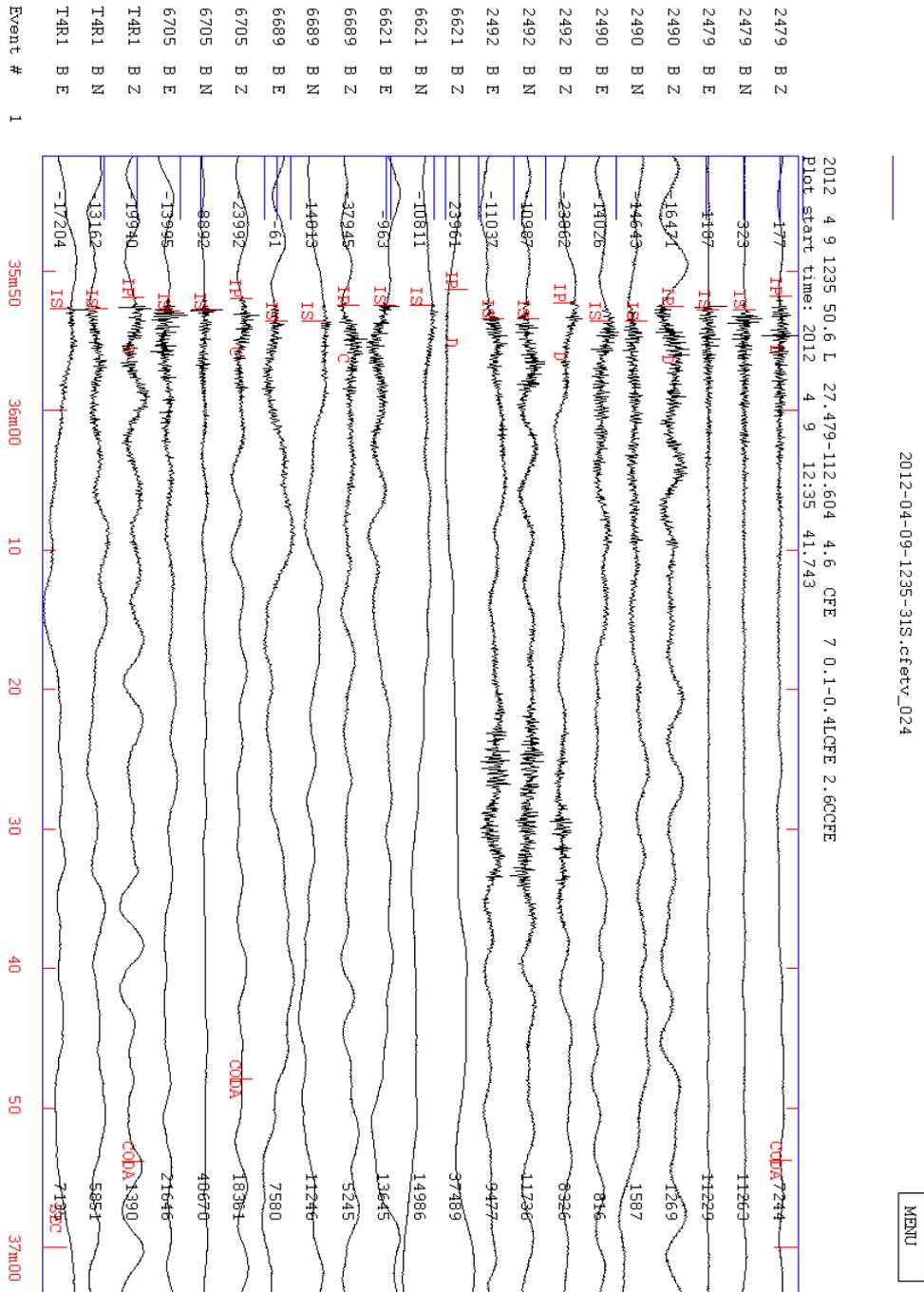
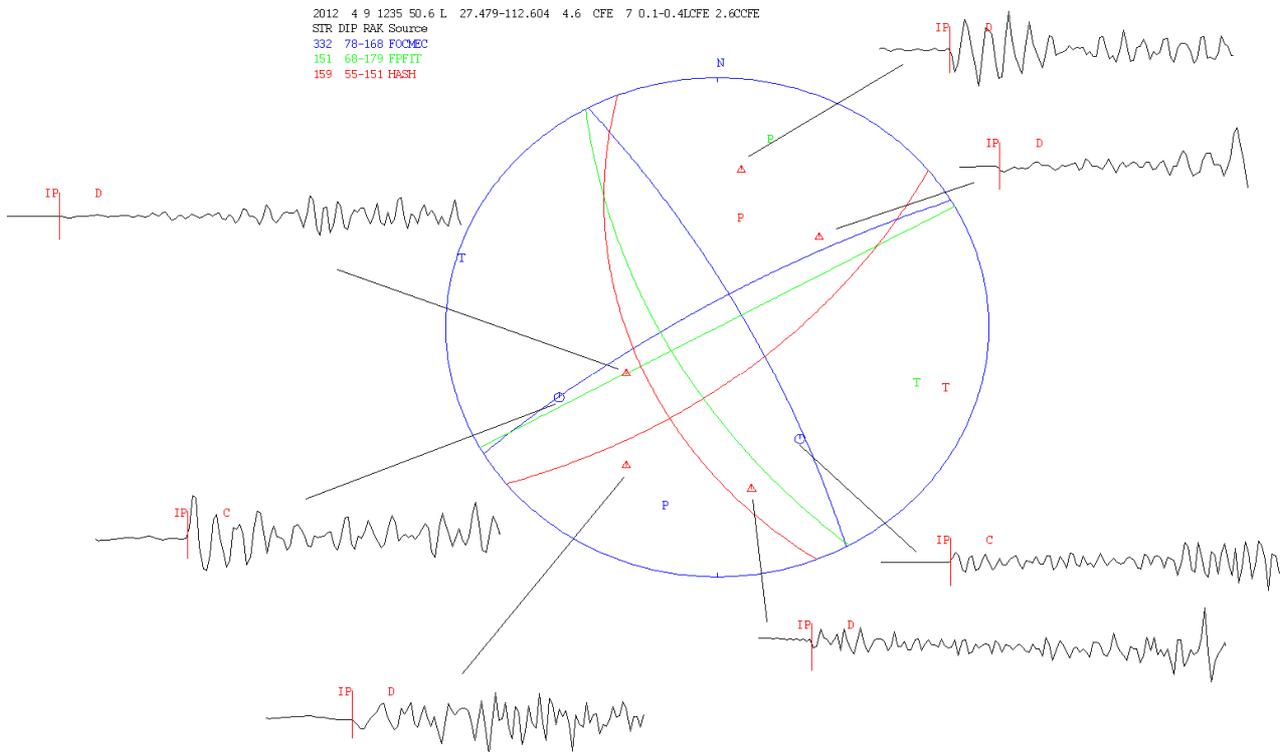


Figura 5.7. Sismograma del evento del día 9 de abril de 2012 a las 12:35 Hrs. Se ha identificado el arribo de las ondas P y S en cada una de las estaciones para determinar su hipocentro.



Resumen de parámetros del plano seleccionado	Strike, Dip, Rake
Plano de falla	332°, 78°, -168°
Plano auxiliar	240°, 80°, -11°
Eje P	196°, 15°
Eje T	286°, 1°

Figura 5.8. Ejemplo de un mecanismo focal obtenido mediante los 3 métodos. Los triángulos rojos representan arribos de onda P de dilatación y los círculos azules de compresión, las letras P y T representan los ejes de presión y tensión respectivamente. Como puede observarse los 3 mecanismos presentan soluciones de plano de falla muy similares, lo que aumenta la confiabilidad de los resultados. El método que más se aproxima a la geometría de la falla es el de FOCMEC por lo que se usó ese resultado para continuar con los análisis siguientes. En la tabla debajo de los datos del evento se enlistan los parámetros que definen al plano de falla del mecanismo de cada método (Strike, Dip y Rake).

La figura 5.9 muestra la ubicación geográfica del evento usado para ejemplificar los mecanismos focales.

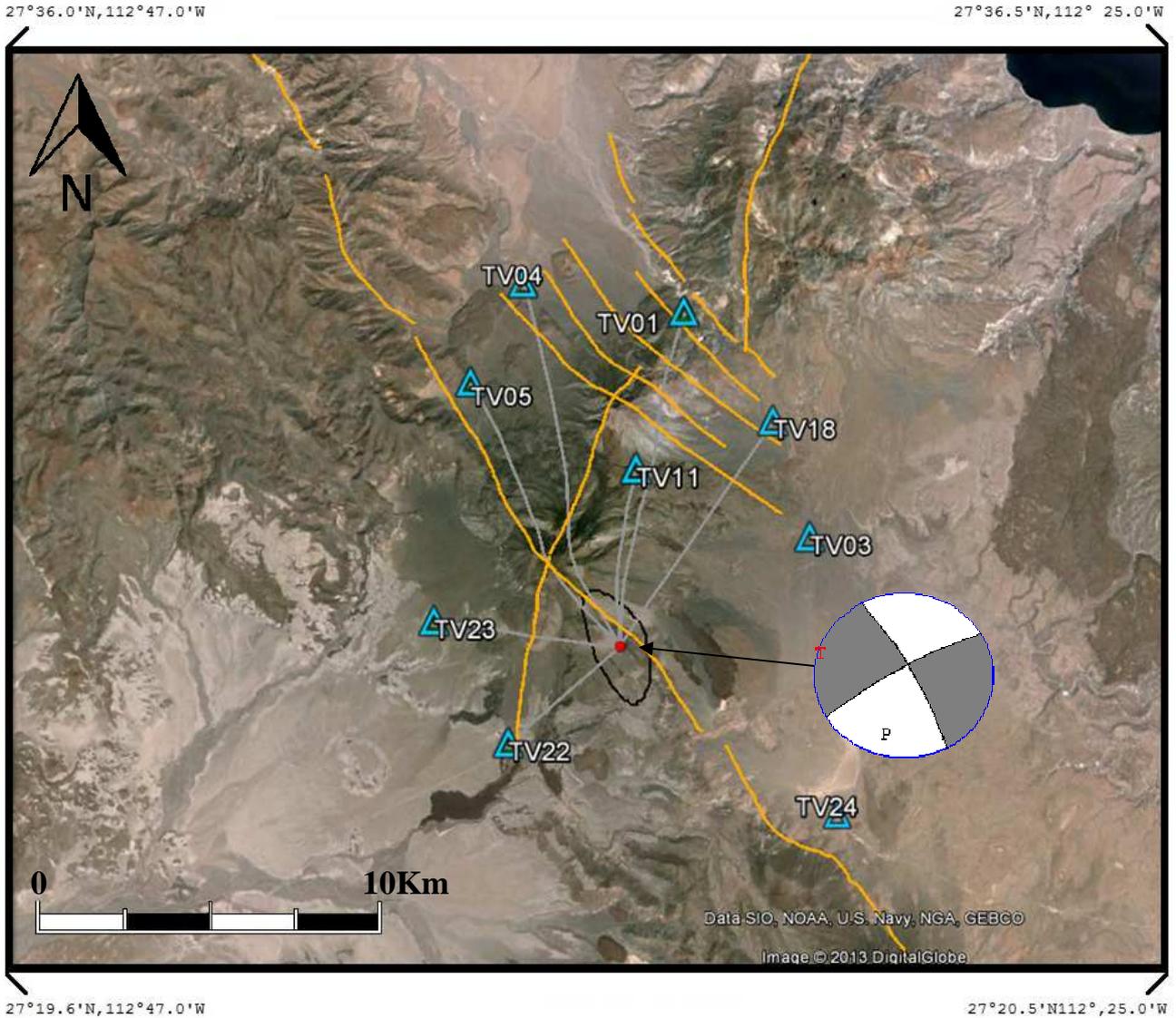


Figura 5.9. Ubicación geográfica y mecanismo focal seleccionado del evento ocurrido el día 9 de abril de 2012 a las 12:35pm.

El mecanismo nos arroja una solución de tipo lateral (de rumbo), como puede observarse la falla asociada se trata de la falla La Virgen, esta tiene una condición cinemática de tipo lateral derecha con componente normal por lo que el resultado arrojado por el mecanismo es coherente con la información geológica.

CAPITULO V

ESTADO DE ESFUERZOS

Interpretación de mecanismos focales

Usando la información geológica estructural del complejo volcánico adquirida a partir de los estudios previos se comparan los mecanismos focales con las fallas que han presentado mayor actividad para establecer su posible relación y determinar los parámetros que definen su movimiento relativo. De los 78 mecanismos focales obtenidos únicamente se utilizaron para estimar el estado de esfuerzos 45 mecanismos ya que estos son los que tuvieron una mayor similitud en las soluciones de los métodos usados (FOCMEC, HASH y FPFIT cuando este último podía ser usado) y el sismo podía ser asociado a alguna de las fallas formalmente reconocidas, el resto de los eventos que no fueron utilizados para estimar el estado de esfuerzos fue debido a que no podemos tener confianza a los mecanismos focales porque presentaban diferencias en las soluciones de plano de falla entre los diferentes métodos. En la tabla siguiente se presentan los parámetros de los sismos utilizados para estimar el estado de esfuerzos que incluye la fecha y hora del evento, coordenadas hipocentrales en latitud, longitud y profundidad y los errores de localización que son: rms, error de latitud, error de longitud y error en profundidad.

# de Evento	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Prof Km	Mag Mc	No. Estaciones	Rms	Error Lat	Error Lon	Error Lon
1	20/09/2003	05:25:10	27°31.41	-112°32.50	4.3	1.0	4	0.04	1.80	1.60	1.40
2	20/09/2003	22:47:52	27°31.15	-112°32.85	4.5	0.9	5	0.02	0.90	0.70	1.10
3	02/11/2003	23:20:26	27°31.31	-112°34.69	5.0	1.3	6	0.07	1.10	0.50	1.30
4	31/05/2006	18:17:29	27°27.95	-112°35.74	6.6	1.8	6	0.05	2.00	0.90	1.80
5	12/06/2009	01:06:09	27°27.59	-112°34.46	6.2	1.7	5	0.08	1.90	1.00	1.90
6	26/12/2009	15:09:52	27°29.13	-112°35.47	5.0	1.5	4	0.04	1.60	0.70	2.50
7	22/04/2010	04:26:16	27°31.14	-112°35.21	5.2	1.4	4	0.04	1.40	0.60	1.80
8	14/05/2010	10:15:00	27°30.96	-112°34.85	4.8	1.2	5	0.07	1.20	0.60	1.80
9	17/11/2010	12:51:33	27°30.94	-112°34.90	5.1	2.2	5	0.02	1.30	0.70	1.70
10	23/12/2010	11:20:09	27°30.48	-112°33.24	3.9	0.7	5	0.07	1.50	1.20	2.10
11	30/12/2010	11:55:13	27°34.20	-112°34.84	6.7	1.5	5	0.09	2.30	1.30	0.70
12	25/03/2011	22:57:33	27°32.41	-112°32.98	6.5	2.2	7	0.10	1.60	1.10	0.60
13	28/03/2011	13:56:25	27°31.91	-112°33.28	6.2	1.7	6	0.05	1.60	0.90	0.60
14	28/03/2011	19:05:00	27°32.72	-112°32.62	7.0	1.1	7	0.06	1.60	1.00	1.30
15	31/03/2011	11:59:32	27°32.30	-112°32.92	6.4	1.4	6	0.02	1.30	0.80	0.40
16	31/03/2011	21:45:00	27°32.56	-112°32.69	7.0	1.0	7	0.05	2.10	1.70	0.40

Tabla 2. Parámetros de los sismos seleccionados (Continúa).

V. ESTADO DE ESFUERZOS

# de Evento	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Prof Km	Mag Mc	No. Estaciones	Rms	Error Lat	Error Lon	Error Lon
17	01/04/2011	12:35:03	27°31.83	-112°33.31	6.4	0.4	6	0.05	1.70	0.90	0.60
18	04/04/2011	09:48:26	27°31.83	-112°33.22	6.3	1.6	6	0.07	1.80	1.00	0.70
19	05/04/2011	18:57:46	27°32.44	-112°32.86	6.7	1.8	7	0.06	1.40	0.90	0.50
20	04/05/2011	01:08:05	27°22.69	-112°29.75	4.9	2.3	6	0.10	1.80	1.40	0.80
21	05/05/2011	01:36:51	27°23.36	-112°30.69	5.1	2.4	6	0.13	2.30	1.90	0.90
22	01/08/2011	09:15:03	27°29.41	-112°35.66	3.0	1.3	6	0.04	0.70	0.60	1.30
23	01/08/2011	09:28:13	27°28.80	-112°35.69	3.4	0.9	6	0.09	0.80	0.60	1.50
24	02/08/2011	05:44:38	27°31.07	-112°35.05	5.1	0.9	6	0.08	1.10	0.90	1.30
25	11/08/2011	14:41:38	27°30.18	-112°34.70	5.1	1.4	8	0.06	0.70	0.50	0.90
26	14/08/2011	10:30:24	27°29.80	-112°35.41	4.9	1.4	8	0.06	0.80	0.60	1.30
27	14/08/2011	10:35:40	27°30.19	-112°35.49	4.8	2.6	8	0.07	0.60	0.40	1.30
28	16/08/2011	23:27:49	27°25.73	-112°33.20	6.7	1.4	8	0.07	1.40	1.00	0.40
29	21/09/2011	08:45:24	27°27.73	-112°36.37	5.3	0.5	7	0.04	1.50	1.30	1.70
30	26/09/2011	00:47:36	27°28.70	-112°35.64	4.1	1.1	7	0.05	0.50	0.40	2.10
31	30/09/2011	03:56:09	27°24.07	-112°31.74	5.6	1.3	7	0.09	1.70	1.20	0.60
32	15/10/2011	07:37:06	27°28.53	-112°35.57	4.4	1.2	8	0.05	0.80	0.70	1.20
33	17/10/2011	02:09:16	27°27.58	-112°36.19	6.3	1.5	8	0.10	1.90	1.70	2.50
34	23/10/2011	20:46:12	27°26.90	-112°34.62	7.4	1.6	6	0.04	2.10	1.80	2.20
35	25/11/2011	17:18:37	27°27.42	-112°34.31	7.7	2.6	6	0.06	2.40	1.90	1.80
36	03/01/2012	16:59:29	27°23.22	-112°31.63	6.5	1.6	6	0.10	2.00	1.30	0.70
37	09/04/2012	12:35:51	27°28.71	-112°36.27	4.6	2.6	7	0.09	0.90	0.70	1.60
38	18/04/2012	15:05:52	27°32.35	-112°38.24	8.3	1.9	8	0.03	2.00	1.40	1.30
39	20/04/2012	10:05:23	27°28.89	-112°35.58	5.3	1.9	8	0.10	1.30	0.90	1.70
40	07/05/2012	23:14:27	27°26.80	-112°34.87	6.1	2.1	7	0.10	1.90	1.50	2.40
41	04/06/2012	17:13:35	27°26.37	-112°36.37	8.5	2.7	5	0.10	2.10	1.80	2.50
42	02/09/2012	02:06:34	27°28.80	-112°35.29	9.6	0.5	8	0.08	1.60	1.30	2.00
43	02/09/2012	03:11:08	27°28.62	-112°35.55	10.5	2.1	8	0.04	2.50	1.80	2.50
44	06/09/2012	06:59:21	27°30.42	-112°34.48	4.4	2.1	7	0.07	2.20	1.50	2.00
45	10/09/2012	18:40:55	27°28.88	-112°37.12	10.5	2.7	8	0.10	1.80	1.50	2.00

Tabla 2. Parámetros de los sismos seleccionados (Continuación). Las profundidades varían de los 3 hasta los 10.5 km con magnitudes que van de los 0.4 a los 2.7 Mc.

Después de analizar cada uno de los mecanismos focales que se enlistaron en la tabla 2 se ha logrado determinar la condición cinemática de los principales sistemas de fallas. Comenzando con la falla de mayor actividad sísmica a lo largo de todo el periodo de estudio se tiene la Falla La Virgen, la interpretación de los mecanismos asociados nos indica que su movimiento más marcado es del tipo lateral derecho con una gran componente normal que buza al NE. Otra falla con un actividad presente a lo largo de todo el periodo de estudio es la falla Las Víboras la cual según las interpretaciones de los mecanismos es de tipo lateral izquierda con una componente normal que buza al E. La falla El Azufre presenta actividad sísmica a lo largo de su traza aunque no demasiada pero suficiente para apreciar es

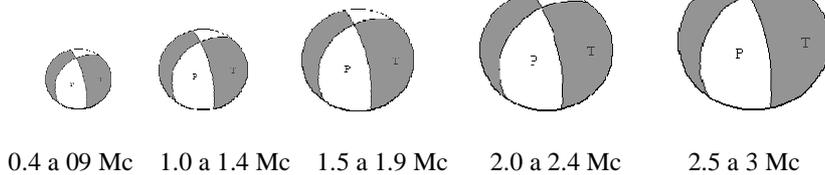
que se trata de una falla de tipo lateral derecha con componente normal buzando al NE. La falla El Cimarrón también presenta evidencias de actividad después de analizar los mecanismos y se respalda la información geológica previa de su movimiento lateral izquierdo con una componente normal que buza al W, debido a las limitaciones en la selección de los datos no se alcanza a cubrir la totalidad de la sismicidad asociada a esta falla.

Para el grupo de fallas centrales del complejo con orientación NW-SE (Falla El Volcan, El viejo I y II y El partido) no ha sido posible determinar con certeza cuales de los eventos sísmicos se asocian a cada una de ellas ya que en estudios anteriores se dice que pudiera tratarse de fallas lístricas lo que dificulta definir el plano de buzamiento, además que dentro de este grupo de fallas existen fallas más pequeñas que no han sido formalmente reconocidas y crean una zona mucho más compleja de estudiar, es por ello que los mecanismos obtenidos a partir de eventos que ocurren dentro de esta zona central dificultan la interpretación adecuada ya que presentan diferencias entre los demás y no se pudo distinguir el plano de falla del auxiliar.

En la Figura 6.1 se muestra la distribución de los sismos utilizados para estimar el campo de esfuerzos y su mecanismo focal correspondiente, como puede observarse los diferentes colores corresponden a cada una de las fallas que fueron asociados los mecanismos, lográndose encontrar una mayor concentración en la falla “La Virgen” y la falla “Las Víboras”, esto es debido a que no solo hay una mayor actividad sísmica en esas zonas, también a que los sismos asociados a estas fallas presentan una mayor magnitud y por lo tanto un sismograma de mayor calidad lo que revela mejor la condición cinemática de la falla.



Escala de Magnitud



Mecanismos asociados

-  Falla Las Víboras
-  Falla El Azufre
-  Falla El Cimarrón
-  Falla La Virgen
-  Conjunto de fallas centrales (El Viejo I y II, El Volcán, El Partido)

Figura 6.1. Distribución de los 45 sismos utilizados con su correspondiente mecanismo focal. Se han separado con diferentes colores los mecanismos para cada falla asociada. Los puntos de colores son los epicentros de los eventos seleccionados.

Como se muestra en la figura anterior la mayoría de los mecanismos focales (incluyendo a los de magnitudes mayores) presentan soluciones de tipo lateral con una marcada componente normal, esto sugiere que el movimiento entre las fallas es principalmente transcurrente, no obstante algunos mecanismos presentan soluciones predominantes de tipo normal, sobre todo a profundidades mayores a los 6 Km, lo que sugiere un movimiento normal existente a estas profundidades. En la parte central del complejo existe un conjunto de mecanismos (color azul) que presentan soluciones muy variadas que incluyen de tipo inverso con componente lateral, lo cual no solo dificulta la asociación a alguna falla en específico por la cercanía de estas, sino también resulta casi imposible definir el plano de falla del plano auxiliar ya que en estudios geofísicos previos se han documentado fallas menores que no afloran en superficie.

Diagramas de roseta

Para determinar el estado de esfuerzos que predomina en la región geotérmica se usan los parámetros de los ejes P y T obtenidos a partir de los mecanismos focales para la construcción de un diagrama de roseta de rumbos. Este diagrama es útil para visualizar las direcciones de los rumbos generales de estructuras (diques, vetas) y de planos tectónicos (diaclasas, fallas, esfuerzos principales, etc.). Puede decirse que funciona como un histograma de forma estereográfico, la cantidad de los datos respecto de un rango se encuentra en el eje desde el centro hacia el perímetro y los datos se ubican al margen del círculo desde arriba (Norte o 0°) hacia abajo (Sur o 180°) en dirección acimutal (sentido horario). Los diagramas de rosetas construidas para los ejes P y T son construidos mediante SEISAN, para esto se utilizan los valores de “Strike y Dip” de cada uno de los ejes P y T.

Se han construido 3 diferentes pares de diagramas de rosetas. El primer par de diagramas construido a partir de los parámetros de los mecanismos asociados al sistema de fallas orientadas NNE-SSW mostrado en la figura 6.2 conformado por las fallas: Las Víboras y El Cimarrón, el segundo par de diagramas mostrado en la figura 6.3 corresponde al conjunto de mecanismos asociados al sistema con orientación NW-SE conformado por las fallas: La Virgen, El Azufre y el conjunto de fallas centrales (El Viejo I y II, El Volcán y El Partido).

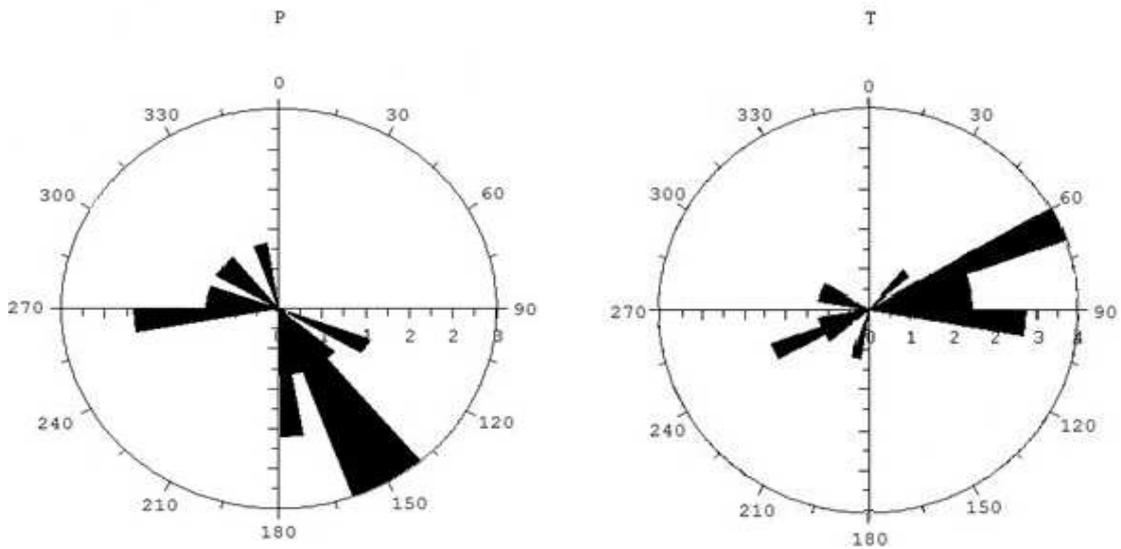


Figura 6.2. Diagramas de roseta para los ejes P y T de los mecanismos asociados a las fallas con orientación NNE-SSW. La dirección principal que predomina para el eje P es con rumbo predominante S30°E y para el eje T un rumbo N60°E.

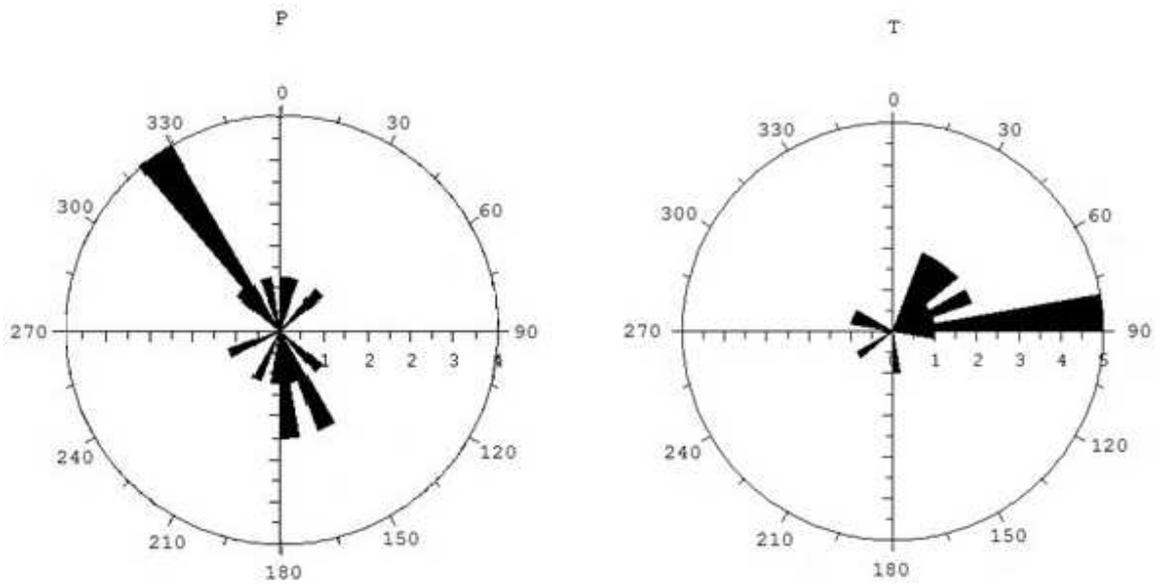


Figura 6.3. Diagramas de roseta para los ejes P y T de los mecanismos asociados a las fallas con orientación NW-SE. La dirección principal que predomina para el eje P es con rumbo predominante N40°W y para el eje T un rumbo N80°E.

Ejes P y T y orientación de esfuerzos

Con la ayuda de los estudios geológicos previos y los parámetros obtenidos a partir de los mecanismos focales se ha estimado el estado de esfuerzos regional para el complejo volcánico de Tres Vírgenes, cabe señalar que los 45 sismos que se han utilizado en este estudio se encuentran bien distribuidos a lo largo de las fallas más activas lo que ayuda a definir la condición cinemática de estas, se encontró una mayor actividad en el sistema de fallas La virgen durante todo el periodo de estudio, confirmando la condición cinemática ya establecida desde los estudios previos con un movimiento lateral derecho con componente normal buzando al NE. El sistema de fallas Las víboras también presentó actividad en todo el periodo de estudio encontrándose mayormente movimiento de tipo lateral izquierdo con componente normal buzando al W; la falla El Azufre también ha presentado actividad y gracias a los mecanismos es posible definir su condición cinemática predominantemente lateral con componente normal aunque la dirección de buzamiento no queda bien definida porque las soluciones indican buzamiento para ambos lados de la falla, sin embargo estudios previos han reportado en esa zona estructuras tipo graben. Luego la Falla El Cimarrón presentó actividad sísmica durante el estudio pero la selección de los eventos cse concentra a un corto periodo de actividad sísmica durante el mes de marzo de 2011, debido a las limitaciones de la selección de datos solo se tienen eventos en la parte sur de la falla, los mecanismos nos dicen que se trata de un movimiento lateral izquierdo con componente normal buzando al W, cabe mencionar que en estudios previos han indicado que existe un buzamiento tanto al W como al E.

Los esfuerzos principales de presión y tensión (es decir, σ_1 y σ_3) presentes en una falla de tipo lateral son ambos horizontales (sólo σ_2 es vertical) , el campo de esfuerzos del presente estudio está dominado por un régimen de tipo lateral (transcurrente) donde los ejes P y T de los mecanismos focales son particularmente coincidentes con este régimen de esfuerzos (generalmente no es así ya que por definición, los ejes P y T siempre son a 45° de los planes nodales, pero los ejes σ_1 y σ_3 del tensor de esfuerzos no son a 45° de los planos nodales). Resulta útil este hecho para estimar el estado de esfuerzos y para ello se muestra en las figuras 6.4 y 6.5 la dirección de los ejes de presión y tensión respectivamente para cada uno de los 45 eventos seleccionados.

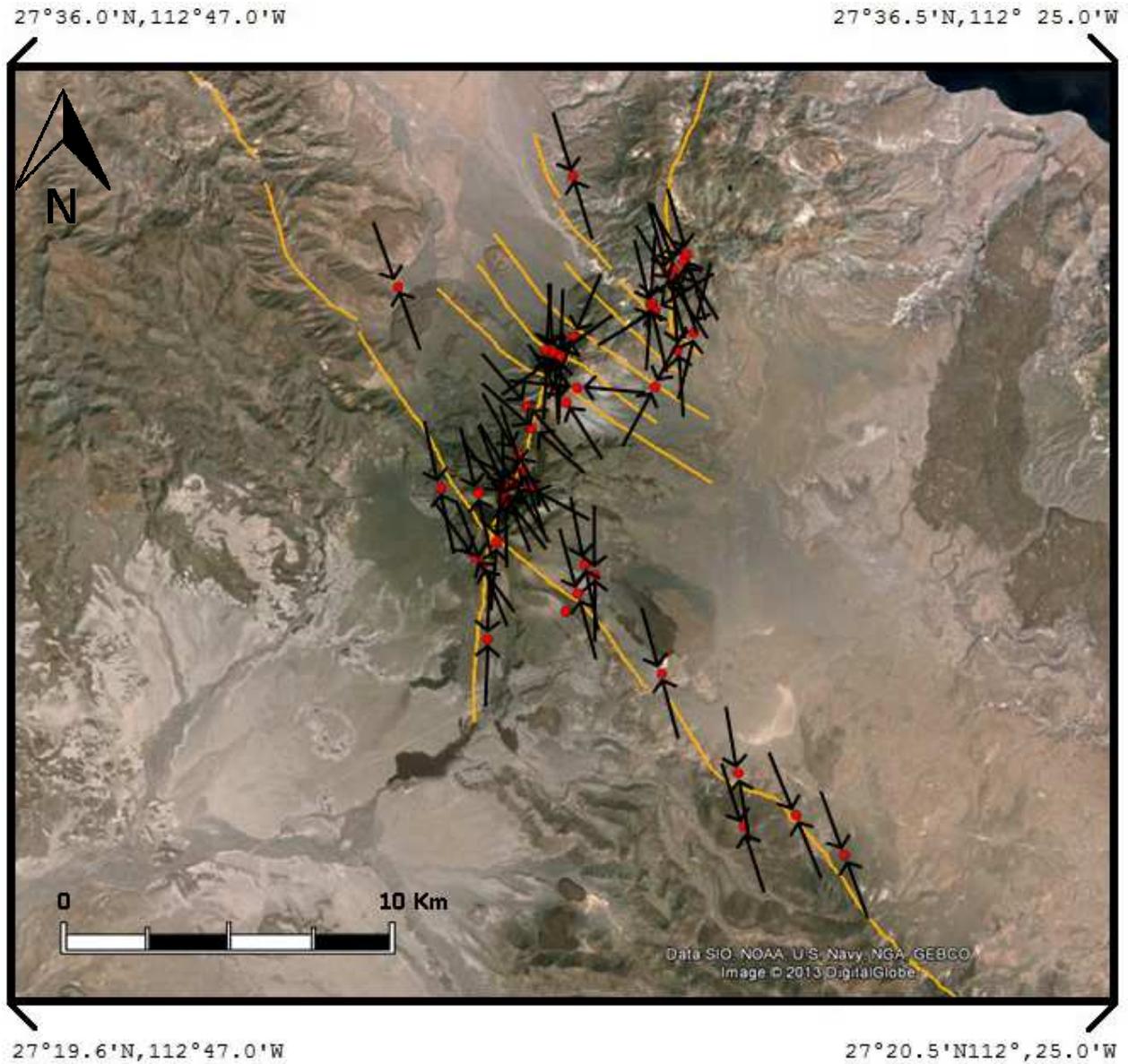


Figura 6.4. Mapa de los 45 eventos seleccionados para la construcción de los mecanismos focales, las flechas negras convergentes representan los ejes de presión de cada mecanismo y los puntos rojos su correspondiente epicentro.

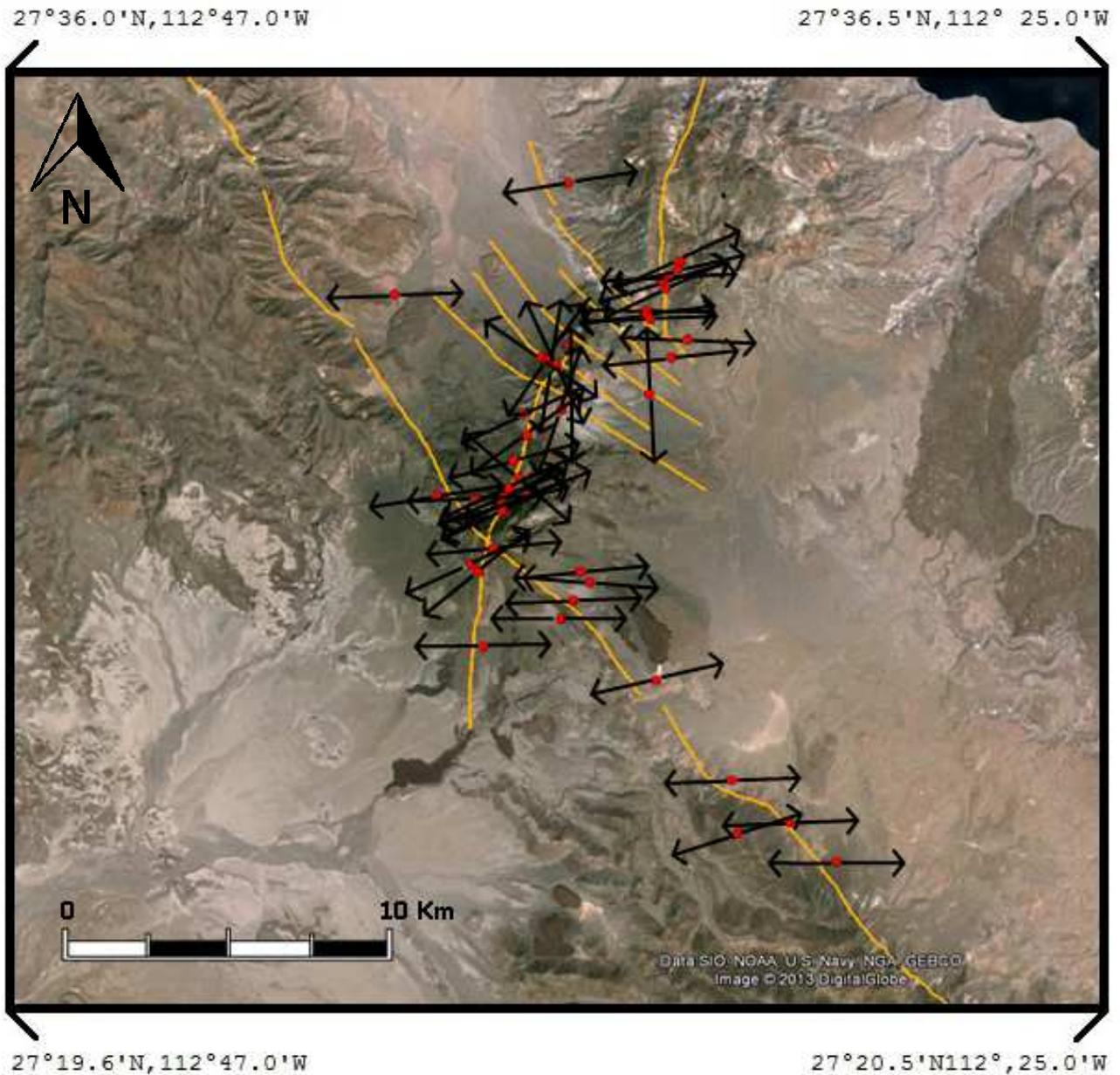


Figura 6.5. Mapa de los 45 eventos seleccionados para la construcción de los mecanismos focales, las flechas negras divergentes representan los ejes de tensión de cada mecanismo y los puntos rojos su correspondiente epicentro.

En resumen se presenta en la figura 6.6 la distribución de los promedios de los ejes P y T en zonas de mayor concentración de eventos. Como se ha mencionado en este capítulo, un régimen de esfuerzos para un modelo de fallamiento lateral la orientación los esfuerzos principales de presión y tensión coincide con la proyección de los ejes P y T de los mecanismos focales, tomando en cuenta esto se muestra en color rojo la orientación de los esfuerzos principales que dominan en el campo geotérmico.

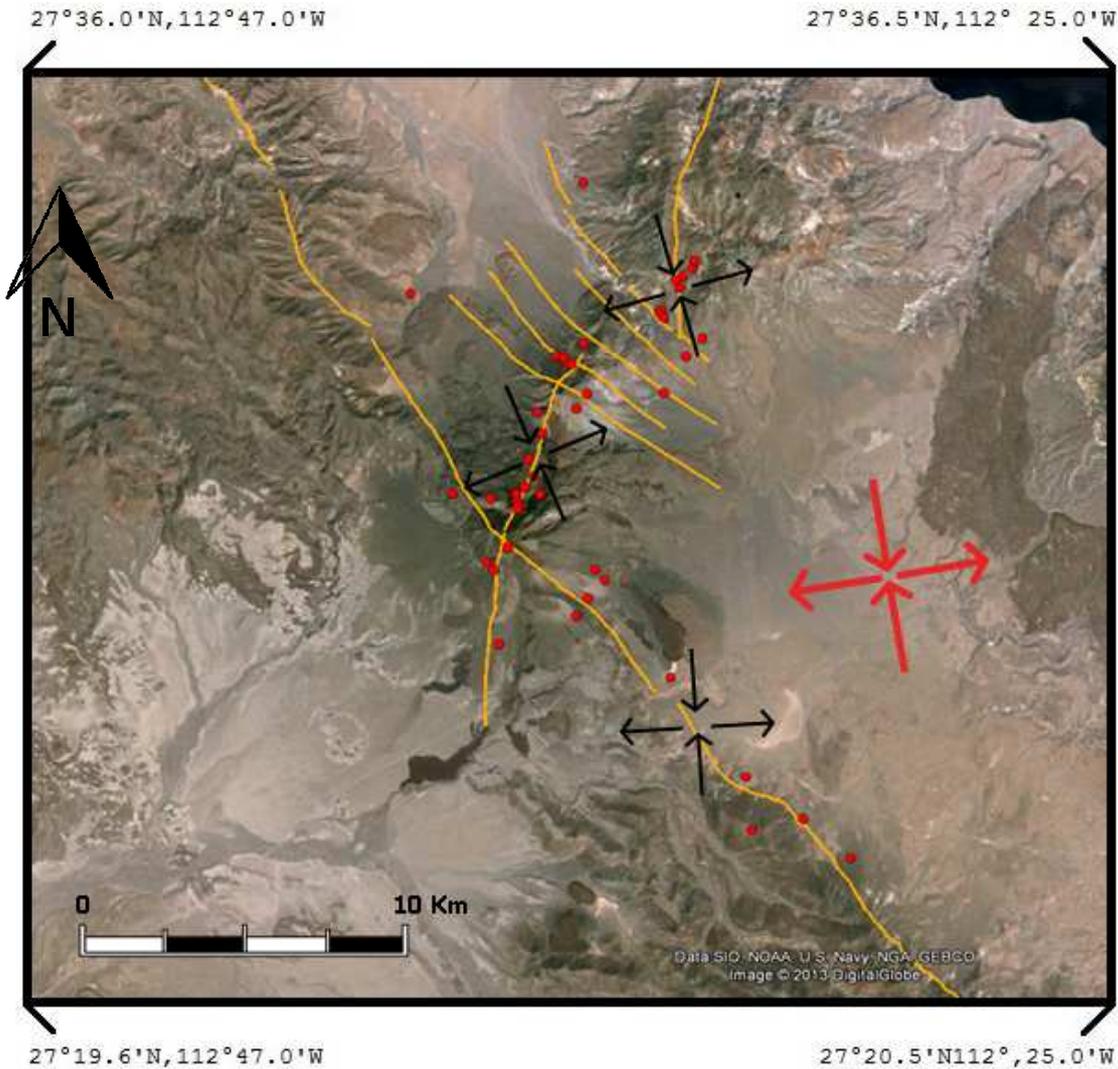


Figura 6.6. Resumen de la distribución de los ejes P y T en las zonas de mayor concentración de eventos. Las flechas negras convergentes representan los ejes de presión y las divergentes los ejes de tensión. Las flechas rojas convergentes indican la orientación de los esfuerzos principales de presión y las flechas negras la orientación de los esfuerzos principales de tensión.

Los esfuerzos principales de presión y tensión tienen una orientación de $N11^{\circ}W$ y $N82^{\circ}E$ respectivamente. El régimen de esfuerzos que presente en el campo geotérmico está dominado por el límite tectónico entre las placas Norteamericana y Del pacífico que se ve reflejado en los sistemas de fallas con orientación NW-S, no obstante el modelo transtensional propuesto por Macías y Jiménez (2013) explica las fallas con orientación NNE-SSW, los mecanismos focales asociados a estas fallas indican que se trata de un movimiento lateral izquierdo, lo que coincide con el modelo teórico transtensional.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Debido a la complejidad en el estudio de zonas volcánicas como es el caso de este campo geotérmico ha ocasionado que la cantidad de datos útiles para este trabajo de sismicidad sea muy reducida por la alta heterogeneidad en los materiales del subsuelo, sumado a esto los eventos registrados en este tipo de zonas son de magnitudes muy pequeñas por lo que la red sísmica muchas veces logra registrar los eventos en no más de 3 estaciones. Sin embargo los eventos seleccionados proveen una alta confiabilidad ya que fueron sometidos a un estricto criterio de selección, y tomando en cuenta que los eventos se encuentran bien distribuidos a lo largo de todo el complejo volcánico se pretende asumir que este pequeño conjunto representa en gran medida las características generales de la sismicidad en todo el campo geotérmico.

Los mecanismos obtenidos de los 45 eventos muestran en general un repetitivo patrón de fallamiento lateral derecho con una componente normal buzando al NE para los sistemas de fallas con dirección NW-SW (con un rumbo promedio de $N40^{\circ}W$), no obstante los mecanismos de la parte central tienen soluciones muy variadas, esto puede ser debido a que en esa zona existen muchas fallas no reconocidas formalmente y es muy probable que existan estructuras de tipo horst-graben lo que es muy frecuente de encontrar en este tipo de ambientes geológicos. Los mecanismos asociados para las fallas con orientación NNE-SSW tienen soluciones con una marcada tendencia de tipo lateral izquierdo (con un rumbo promedio de $N18^{\circ}E$) con una componente normal, aunque esta tenga una dirección de buzamiento tanto al E como al W.

Las fallas que han presentado mayor actividad durante todo el periodo de estudio y con mayor cantidad de eventos seleccionados son las fallas La Virgen y Las Víboras, luego le siguen las fallas El azufre y EL Cimarrón (aunque el estudio de esta última se limita a la sección sur de toda la traza de la falla). Por último el conjunto de fallas centrales formado por El Volcán, El Viejo I y II y El Partido a pesar de existir actividad sísmica dentro de estas el presente trabajo no ha logrado estimar una condición cinemática específica de cada una de ellas por la dificultad al asociar los eventos, esto es, como se ha mencionado en los capítulos anteriores porque la cercanía entre las fallas comúnmente puede confundir un plano de falla con otro cercano ya que los antecedentes de estudio sugieren que se trate de un conjunto de fallas lístricas.

Los diagramas de rosas de los ejes P y T nos dicen que los esfuerzos dominantes de tensión se encuentran orientados al E y los de presión al NNW-SSE, esto quiere decir que los esfuerzos del campo

geotérmico se encuentran dominados por el régimen tectónico regional, es decir, por el movimiento entre las placas norteamericana y del pacífico.

Estos resultados coinciden con el primer trabajo realizado sobre la estimación del campo de esfuerzos realizado por Wong y Munguía en 2005 que uso datos de 1993.

Este trabajo ha servido para relacionar los resultados obtenidos por Wong y Munguía en 2005, y comprobar la teoría propuesta por Macías y Jiménez en enero de 2013 donde proponen que los sistemas de fallas que se encuentran en el complejo volcánico forman parte de un modelo transtensional asociado a la apertura del golfo de California.

Por otro lado al hacer un análisis de los parámetros de cada uno de los eventos seleccionados se pueden desprenderse una serie de resultados que van más allá del objetivo principal de este trabajo.

Los eventos asociados a la falla El Cimarrón ocurren a una profundidad concentrada alrededor de los 6.7 km y las magnitudes variaron de 1 a 2.2 Mc, a pesar que los eventos asociados a esta falla se registraron únicamente durante el mes de marzo de 2011 no se puede definir su condición cinemática general ya que solo se tomaron en cuenta los sismos ocurridos en la parte sur de la falla.

Para la falla El Azufre se han seleccionado datos de 2003, 2010 y 2011, las profundidades que se registraron para la actividad sísmica de esta zona varían de los 4.3 a los 6.7 Km con magnitudes entre los 0.4 y 1.7 Mc, aunque la actividad sísmica de esta falla ha sido documentada en estudios previos, no se puede definir su condición cinemática en este trabajo ya que los eventos seleccionados asociados a esta falla son muy pocos.

La falla Las Víboras sin duda ha presentado actividad sísmica durante todo el periodo de estudio a pesar que la selección de datos asociados a esta falla comienzan desde el año 2009, las profundidades registradas de estos eventos son muy variadas ya que van desde los 3 a los 10.5 Km al igual que las magnitudes que van del 0.5 al 2.7 Mc, la actividad sísmica tiene una concentración alrededor del volcán La Virgen y al observar los mecanismos focales puede concluirse que a profundidades entre los 3 y los 4.5 km el movimiento predominante de la falla es de tipo lateral izquierdo y a profundidades mayores el movimiento predominante es más de tipo normal.

La falla la Virgen ha demostrado tener actividad sísmica constante y los eventos seleccionados asociados a esta falla varían entre los 4.6 y los 10.5 Km de profundidad con magnitudes que van de 1.3 a 2.7 Mc. Los mecanismos focales revelan que el movimiento de la falla es casi por completo lateral derecho con una componente normal presente a excepción del evento #45 que su movimiento es

predominantemente normal, este evento es el más profundo registrado que se encuentra a los 10.5 Km por lo que puede concluirse que entre los 4.5 y los 8 Km aproximadamente el movimiento de la falla es lateral derecho y a una profundidad mayor el movimiento predominante es de tipo normal.

En cuanto al grupo de eventos que se encuentran dentro del grupo central de fallas con orientación NW-SE es posible que sean causados por movimientos entre fallas que se cruzan entre sí como puede ser el caso de la falla Las Víboras que atraviesa el grupo de fallas El Volcán, El Viejo I y II y según el modelo geológico propuesto por CFE (2010), esta falla tiene una traza que atraviesa la falla el azufre. Esta sismicidad ocurrida dentro de las intersecciones de los sistemas de fallas NW-SE y NNE-SSW revela importantes zonas de fracturamiento en las rocas que sirven como medios conductores de fluidos hidrotermales que son útiles para la producción de vapor y constituyen un valor para intereses geotérmicos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye que hasta los 10 Km aproximadamente es posible encontrar actividad sísmica con un mínimo de margen de error, más allá de esta profundidad se cree que se encuentra la cámara magmática.

Las magnitudes esperadas en este complejo volcánico no exceden a los 3° Mc y las 2 fallas más activas son La Virgen Y Las Víboras.

Otras fallas activas actualmente son El Cimarrón y El Azufre. Sin embargo esto no significa que las fallas centrales con orientación NW-SE no se encuentren activas pero la sismicidad registrada no puede asociarse a una falla en específico.

Los mecanismos focales indican un movimiento lateral derecho para las fallas con orientación NW-SE y con una componente normal al NE, para las fallas con orientación NNE-SSW existe un movimiento lateral izquierdo y un buzamiento al W lo que confirma el modelo de deformación transtensional de extensión propuesto por Macías y Jiménez en 2012. Sin embargo los mecanismos con variaciones en las soluciones se deben muy probablemente a la actividad hidrotermal en esas zonas, es decir, en la eyección de fluidos geotérmicos e inyección por parte de los pozos de la planta geotermoeléctrica.

El régimen de esfuerzos presente en el campo geotérmico está dominado por los esfuerzos provocados por el límite tectónico entre las fallas Norteamericana y Del Pacífico. Y comparado con el trabajo de Wong Y Munguía en 2005, la dirección de los esfuerzos principales de presión y tensión coincide de forma genérica.

Se recomienda dar mantenimiento a la red sísmica frecuentemente ya que algunas estaciones se encontraban en desfase con las demás.

Es necesario complementar los estudios de sismicidad con otros métodos geofísicos para inferir con mayor certidumbre la geometría de los sistemas de fallas en el campo geotérmico.

Para obtener mecanismos focales con mayor confiabilidad se necesita un mayor número de polaridades de onda, por lo que se sugiere aumentar el número de estaciones en la red sísmica.

REFERENCIAS

- Chavacan A, M. 2007. Catálogo de sismicidad local para la cuenca de México. Tesis M. México. UNAM, Instituto de Geofísica 160 p.
- Chavacán, M., Lermo, J. Quintanar, L. 2004. Determinación de una escala de magnitud para temblores corticales en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano. Memorias de la I Conferencia Internacional de Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica, Santiago de Cuba, Cuba. 1-4 de junio, 2004.
- Gómez López, J. G., Pulido Arreola, S., Soto Peredo, J., Sandoval Medina, F., 2010, Modelo geotérmico actualizado del C. G. Las Tres Vírgenes, B. C. S. Informe DEX-DGL-DGFDGQ-TV-05-10, de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, C. F. E., Junio 2010, pp 37.
- Havskov, J. y Macías, M., 1983, A coda-length magnitude scale for some Mexican stations. *Geofísica Internacional*. Vol 22, N° 3, pp. 205-213.
- Lermo, J., F. Romero, Y. Antayhua, I. Bernal, D. Vega y M. Chavacán., 2004, Estudio de la actividad sísmica del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S., Informe Técnico, Instituto de Ingeniería, UNAM, elaborado para la CFE- Gerencia de proyectos Geotermoeléctricos, Convenio: 9400012354, proyecto 3539, Junio del 2004, pp 46.
- Lermo, J., Yanet Antayhua, German Espitia y Melitón Flores Cárdenas 2006, Monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Las Tres Virgenes, B.C.S., *Coord. Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería*, Universidad Nacional Autónoma de México, realizado para: CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Dpto. de Exploración, proy 6515, México, pp 34.
- Lermo, J., Efen Cruz, Eloy Mondragon, Carlos Valdes, Germán Espitia, 2008, Monitoreo Sísmico en el campo geotérmico de las Tres Vírgenes, Baja California Sur, *Instituto de Ingeniería*, Universidad Nacional Autónoma de México, realizado para CFE, Subdirección de Generación, proyecto 8530, México, 40 pp.
- Lermo, J., Efen Cruz, Pedro Hernández, Fernando Nuñez, Edgar Urban y Germán Espitia, 2009, Estudio de sísmica pasiva en Tres Vírgenes, BCS, Periodo 2009, *Instituto de Ingeniería*, Universidad Nacional Autónoma de México, realizado para CFE, Subdirección de Generación, Convenio No 9400046742, proyecto 9520, México, 53 pp.
- Lermo, J., Adriana Vargas, Edgar Urban, Héctor Rodríguez, Fernando Nuñez y Germán Espitia, 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.

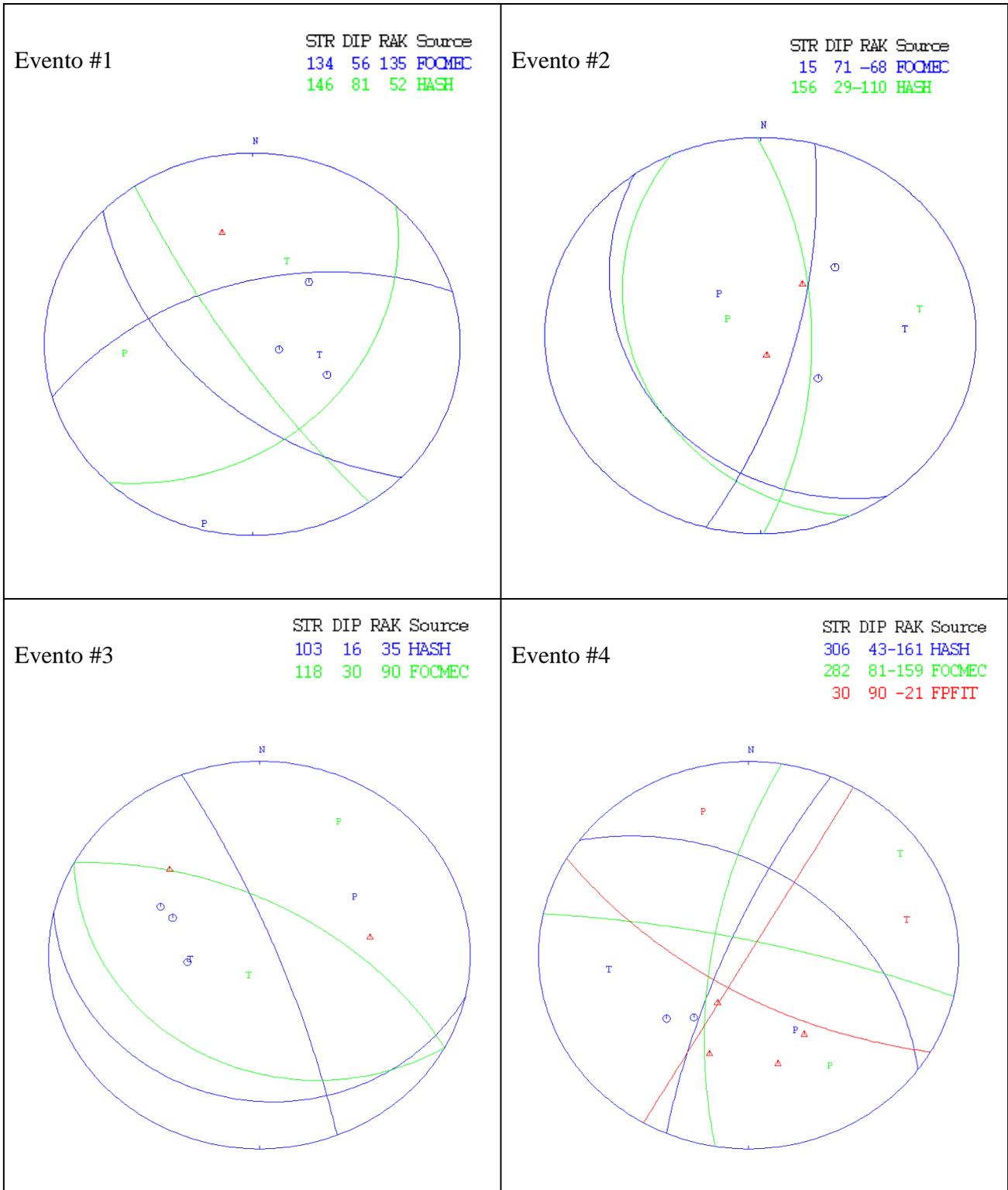
- Lermo, J., Adriana Vargas, Edgar Urban, Héctor Rodríguez, Fernando Nuñez, Julio Romero, Germán Espitia y José Antonio Martínez, 2011, Estudio de sismica pasiva en Las Tres Vírgenes, BCS., Periodo 2011, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, realizado para CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Departamento de Exploración, proyecto CFE-DEV-DGF-TV-11, México, 96 pp.
- Lorenzo, C; Soto, J., 2013, Sismicidad en el complejo volcánico de Las Tres Vírgenes, B. C. S. México. Geotermia Vol. 26, No. 1. 34-43
- Macías, J; Jiménez, E., 2013, *Estudio de Estratigrafía y Geología del complejo volcánico Tres Vírgenes, B.C.S.* México. Geotermia Vol. 26, No. 1. 14-23.
- 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.
- 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, BCS, México. Geotermia Vol. 19, No. 2. 13-23
- Wong, V., and Munguía, L., 2001, Attenuation of Coda Waves at the Tres Vírgenes Volcanic Area, Baja California Sur, México. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 91. N° 4. pp. 683-693.
- Wong, V., and Munguía, L. 2006, Seismicity, focal mechanisms, and stress distribution in the Tres Vírgenes volcanic and geothermal region, Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional*. Vol. 45. N° 1. pp. 23-37.

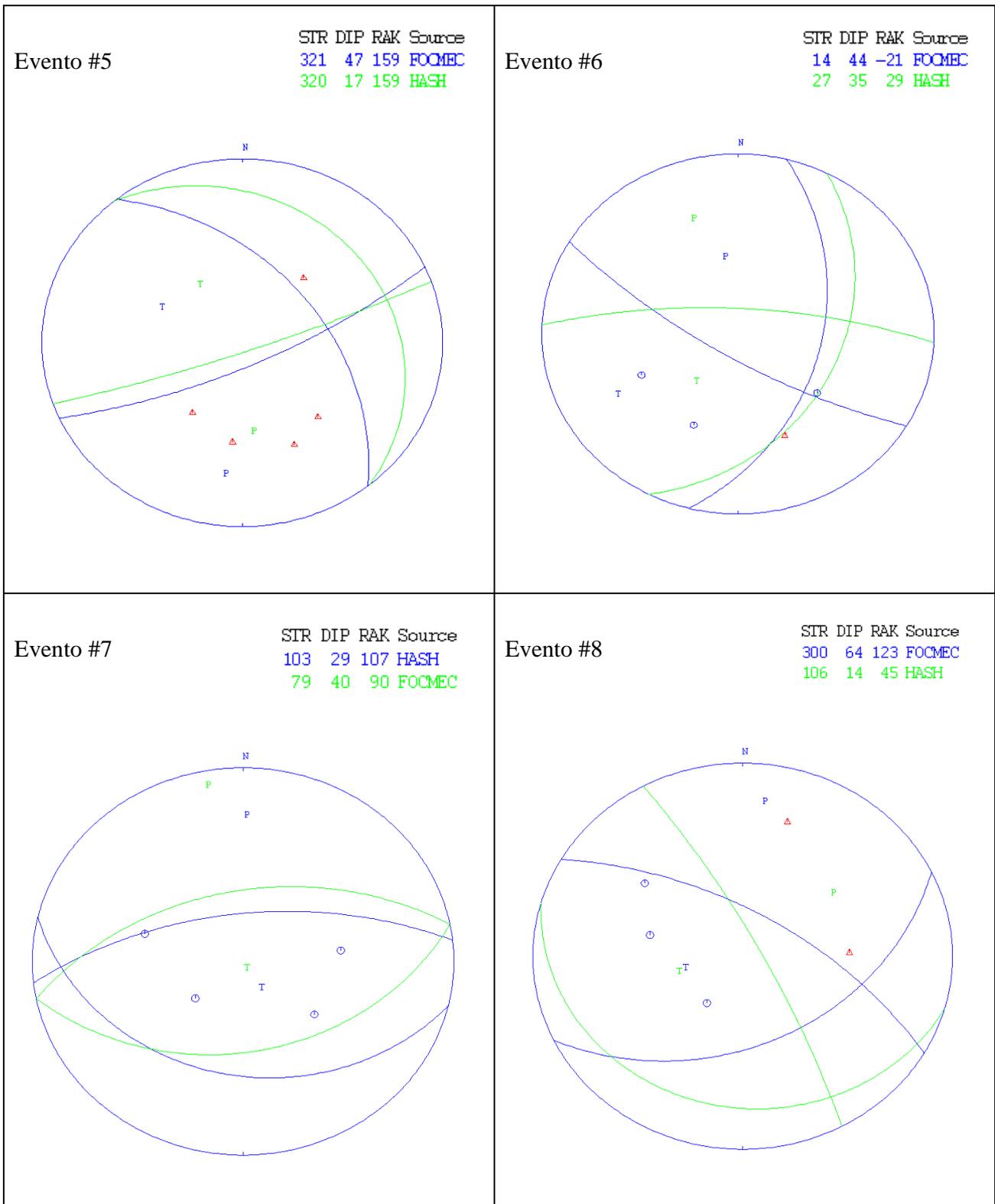
ANEXOS

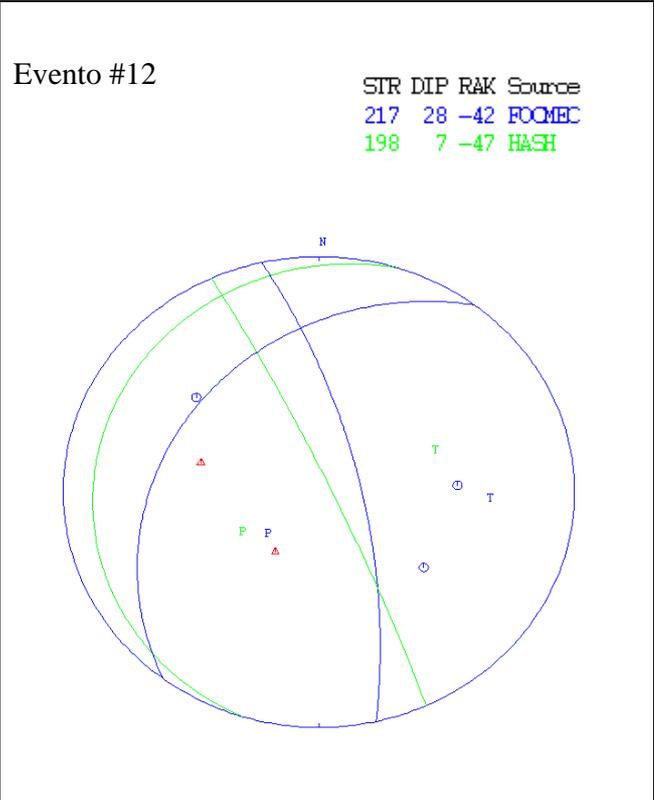
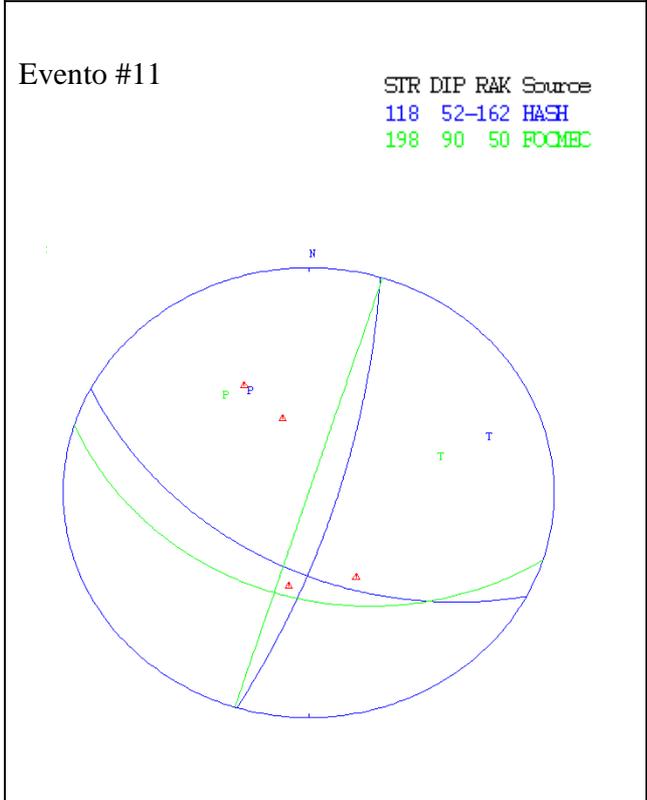
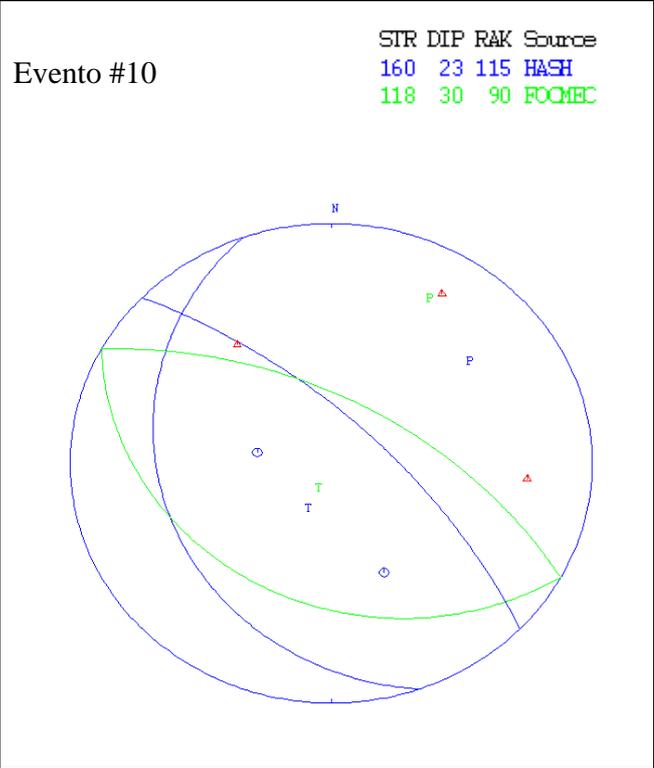
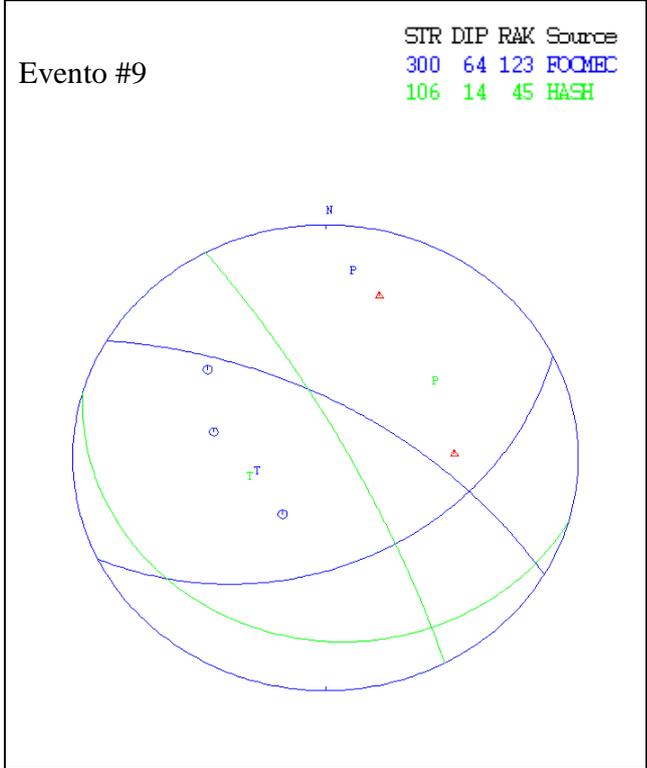
# de Evento	Fecha	Hora	PLANO DE FALLA			PLANO AUXILIAR			EJE P		EJE T	
			STRIKE	DIP	RAKE	STRIKE	DIP	RAKE	azi	buz	azi	buz
1	20/09/2003	05:25:10	134	56	135	254	54	52	194	1	103	55
2	20/09/2003	22:47:52	135	35	-145	15	71	-68	321	54	83	21
3	02/11/2003	23:20:26	103	16	35	343	81	103	61	35	268	51
4	31/05/2006	18:17:29	306	43	-161	206	82	-47	153	38	264	24
5	12/06/2009	01:06:09	321	46	159	67	75	48	187	18	294	42
6	26/12/2009	15:09:52	14	44	-21	117	76	48	347	43	237	20
7	22/04/2010	04:26:16	103	29	107	261	62	80	359	17	149	70
8	14/05/2010	10:15:00	217	28	-42	346	72	-111	227	58	92	24
9	17/11/2010	12:51:33	300	64	123	64	41	41	7	13	256	57
10	23/12/2010	11:20:09	160	23	115	313	69	80	51	24	206	64
11	30/12/2010	11:55:13	118	52	-162	15	74	-40	329	39	71	14
12	25/03/2011	22:57:33	217	28	-42	342	73	-112	223	56	89	25
13	28/03/2011	13:56:25	301	64	164	38	76	27	168	8	262	29
14	28/03/2011	19:05:00	210	90	60	113	36	171	328	31	88	40
15	31/03/2011	11:59:32	19	82	-61	124	30	-161	318	46	86	31
16	31/03/2011	21:45:00	208	52	11	111	81	142	165	19	62	33
17	01/04/2011	12:35:03	155	11	-100	349	79	-87	262	56	77	34
18	04/04/2011	09:48:26	247	90	50	155	45	177	12	34	121	32
19	05/04/2011	18:57:46	26	79	-70	144	23	-149	319	52	100	31
20	04/05/2011	01:08:05	116	38	-179	26	90	-52	328	34	84	34
21	05/05/2011	01:36:51	114	40	172	210	90	60	331	29	86	37
22	01/08/2011	09:15:03	162	56	-67	297	44	-126	127	65	232	7
23	01/08/2011	09:28:13	195	42	13	95	81	131	154	26	42	39
24	02/08/2011	05:44:38	176	62	67	39	35	126	283	14	46	65
25	11/08/2011	14:41:38	292	42	-144	169	64	-56	125	57	235	12
26	14/08/2011	10:30:24	6	81	-69	121	20	-153	297	50	80	33
27	14/08/2011	10:35:40	180	15	-89	360	75	-90	268	63	88	27
28	16/08/2011	23:27:49	315	90	-157	225	65	0	183	17	87	17
29	21/09/2011	08:45:24	190	30	0	280	90	-120	163	38	37	38
30	26/09/2011	00:47:36	183	46	-1	275	88	-136	148	31	40	28
31	30/09/2011	03:56:09	131	48	-145	17	66	-47	335	50	78	11
32	15/10/2011	07:37:06	185	75	34	85	57	162	312	12	50	35
33	17/10/2011	02:09:16	206	40	0	116	90	130	173	33	59	33
34	23/10/2011	20:46:12	316	63	-137	204	54	-35	174	48	78	5
35	25/11/2011	17:18:37	330	59	168	66	80	28	194	14	292	29
36	03/01/2012	16:59:29	295	74	-135	190	48	-30	162	42	57	16
37	09/04/2012	12:35:51	332	79	-169	240	80	-11	196	15	286	1
38	18/04/2012	15:05:52	297	68	125	55	41	35	2	16	250	53
39	20/04/2012	10:05:23	180	30	-90	360	60	-90	90	75	90	15
40	07/05/2012	23:14:27	334	75	-128	226	40	-23	205	46	92	21
41	04/06/2012	17:13:35	217	54	-36	331	61	-138	187	50	93	4
42	02/09/2012	02:06:34	213	78	-86	18	12	-105	127	56	300	33
43	02/09/2012	03:11:08	211	77	-87	16	13	-105	125	57	298	32
44	06/09/2012	06:59:21	143	58	0	53	90	148	103	22	103	22
45	10/09/2012	18:40:55	357	29	-138	229	71	-67	169	58	302	23

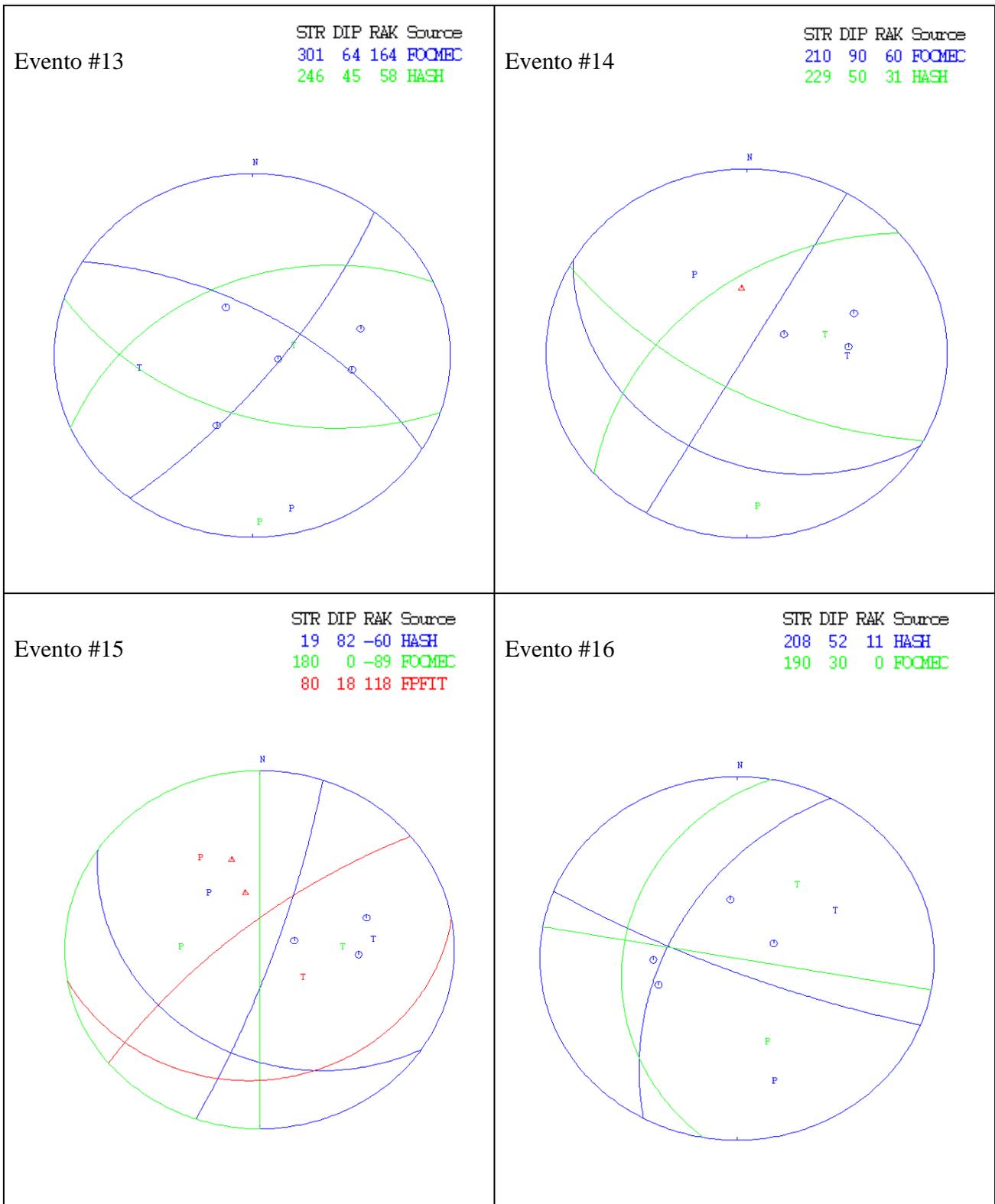
Tabla 1. Resumen de parámetros de los mecanismos focales.

Mecanismos focales de los 33 eventos seleccionados mediante los métodos de FOCMEC, HASH Y FPFIT.



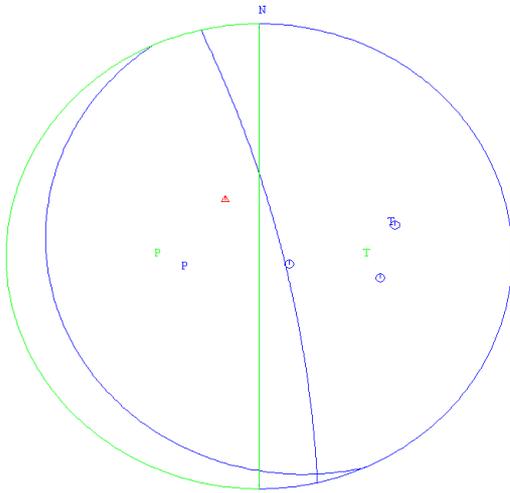






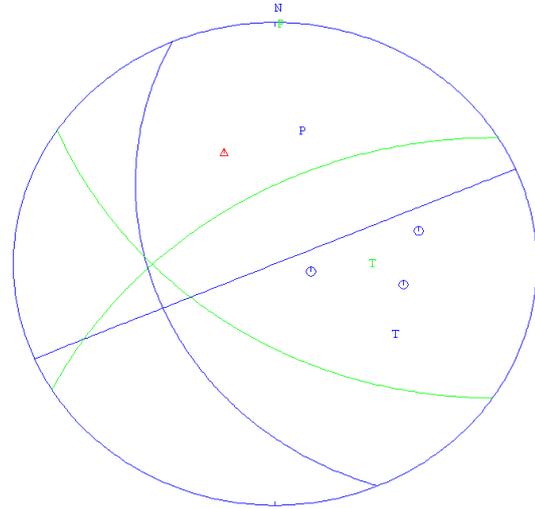
Evento #17

STR	DIP	RAK	Source
155	11-100	HASH	
180	0 -89	FOCMEC	



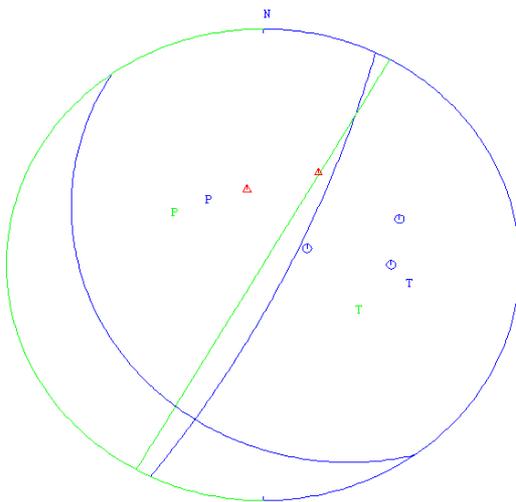
Evento #18

STR	DIP	RAK	Source
247	90	50	FOCMEC
239	58	41	HASH



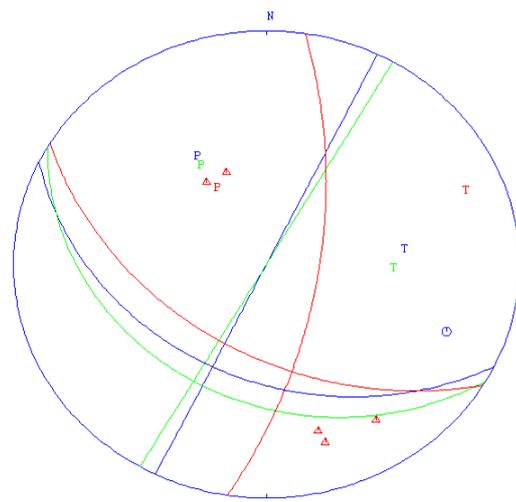
Evento #19

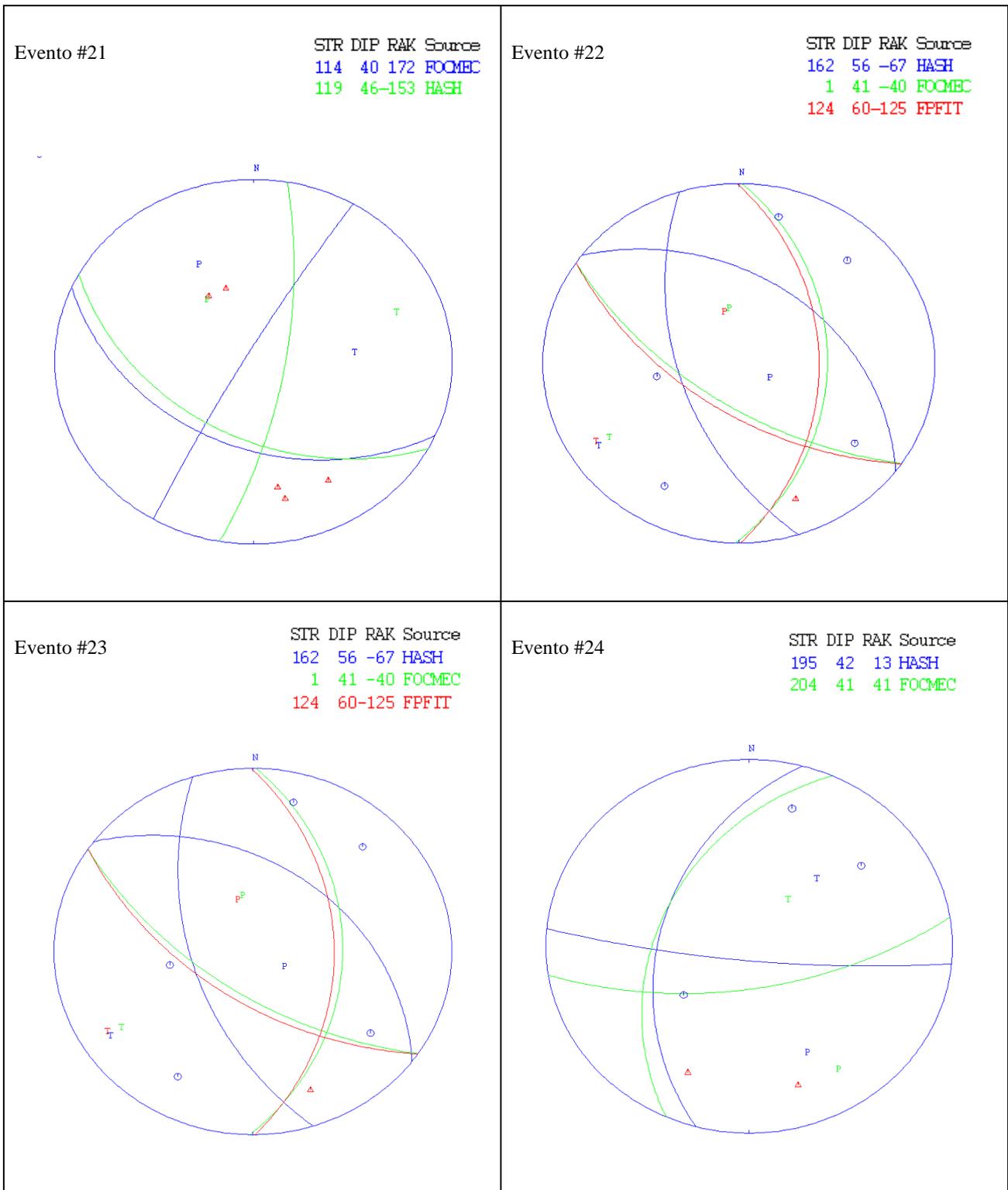
STR	DIP	RAK	Source
26	79 -69	HASH	
180	0-119	FOCMEC	

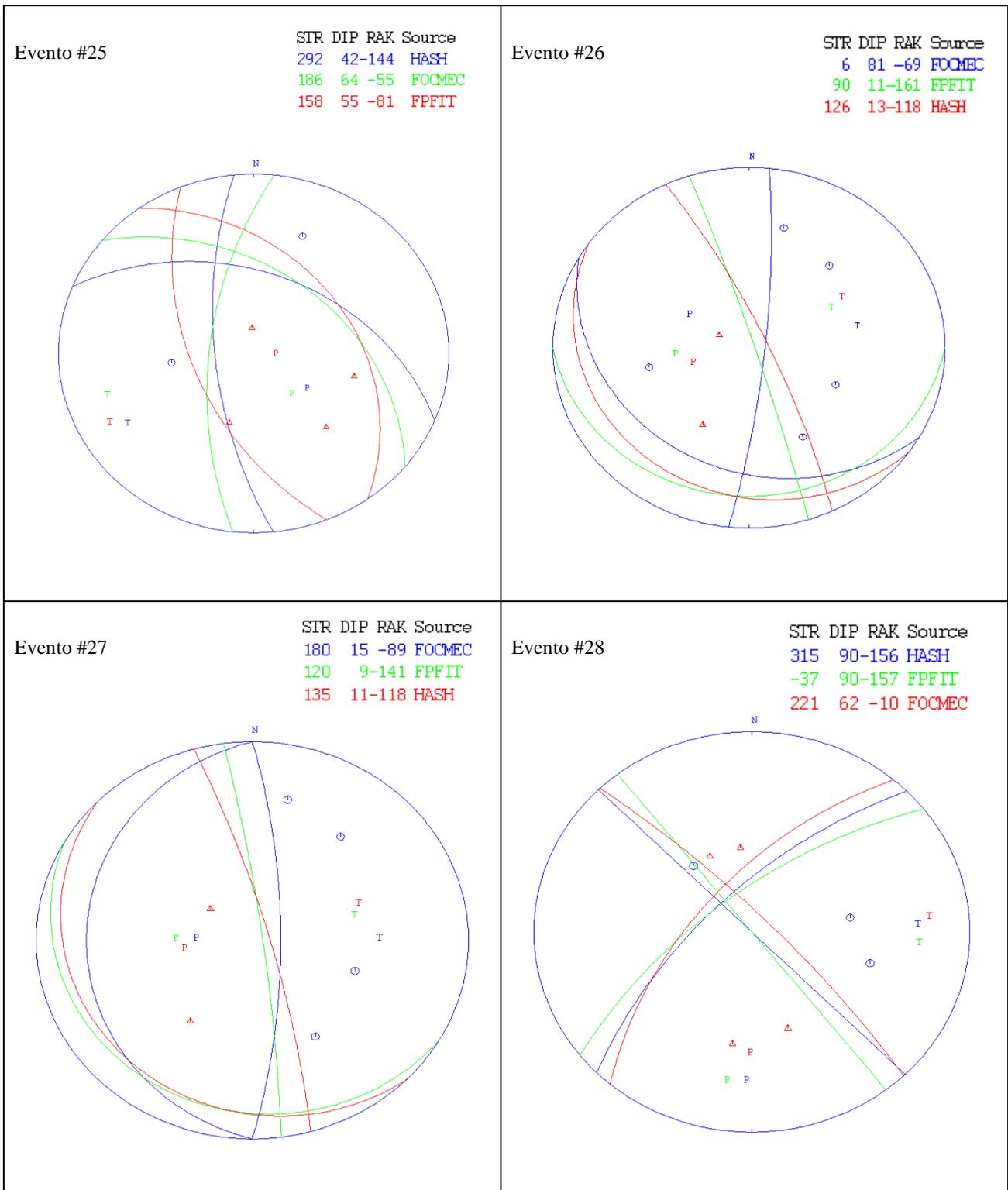


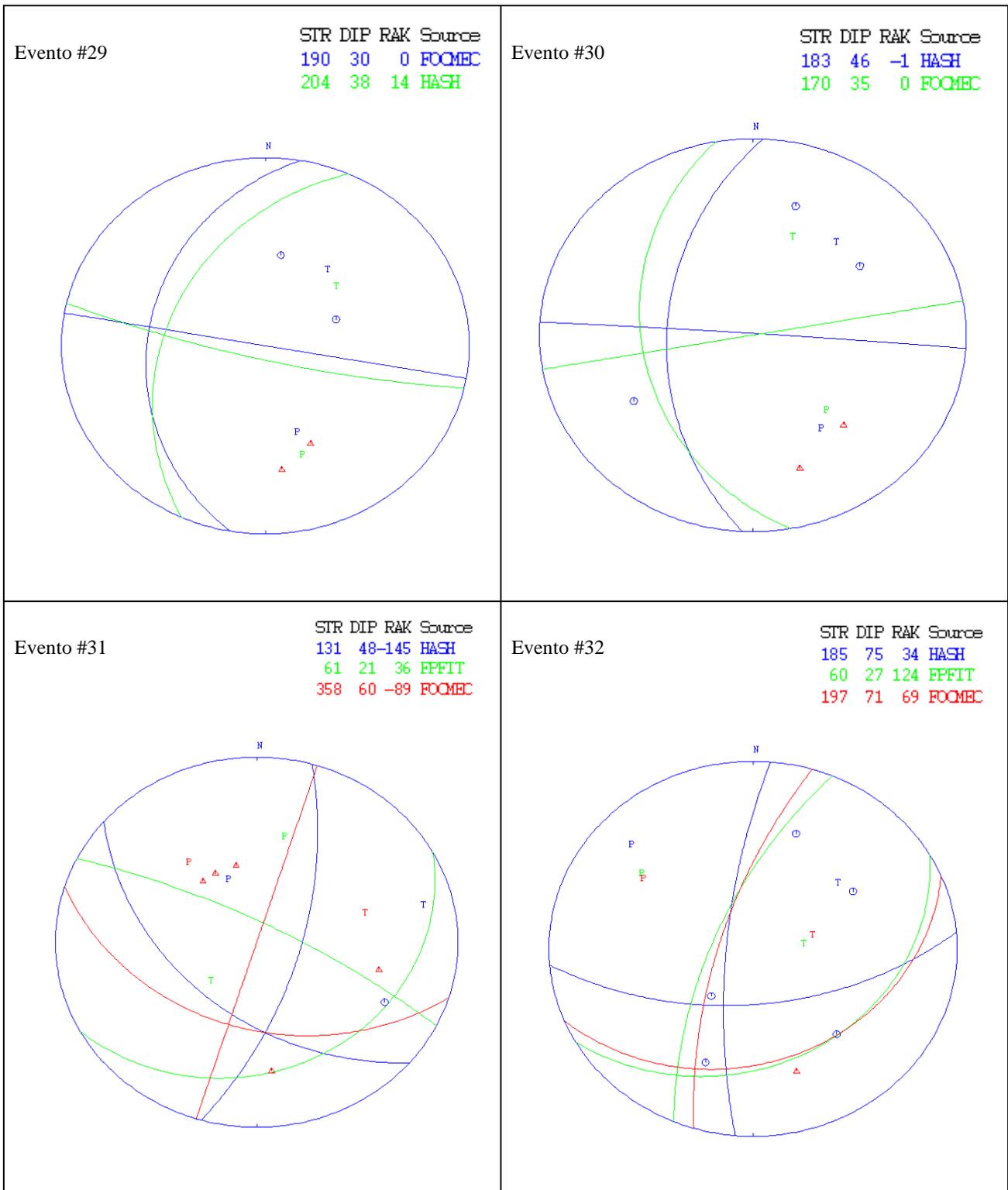
Evento #20

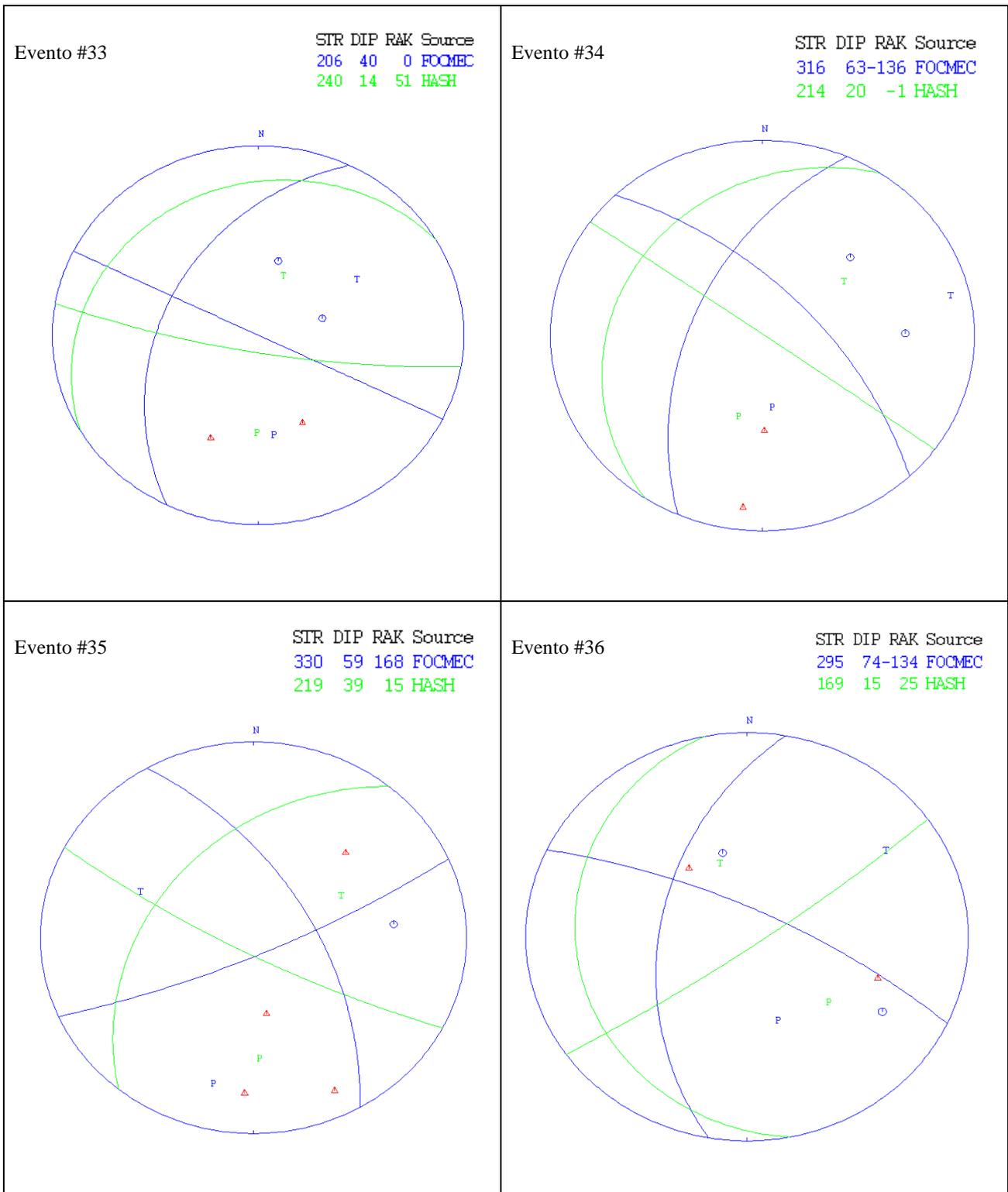
STR	DIP	RAK	Source
116	38-179	EPFIT	
210	90	60	FOCMEC
121	49-147	HASH	

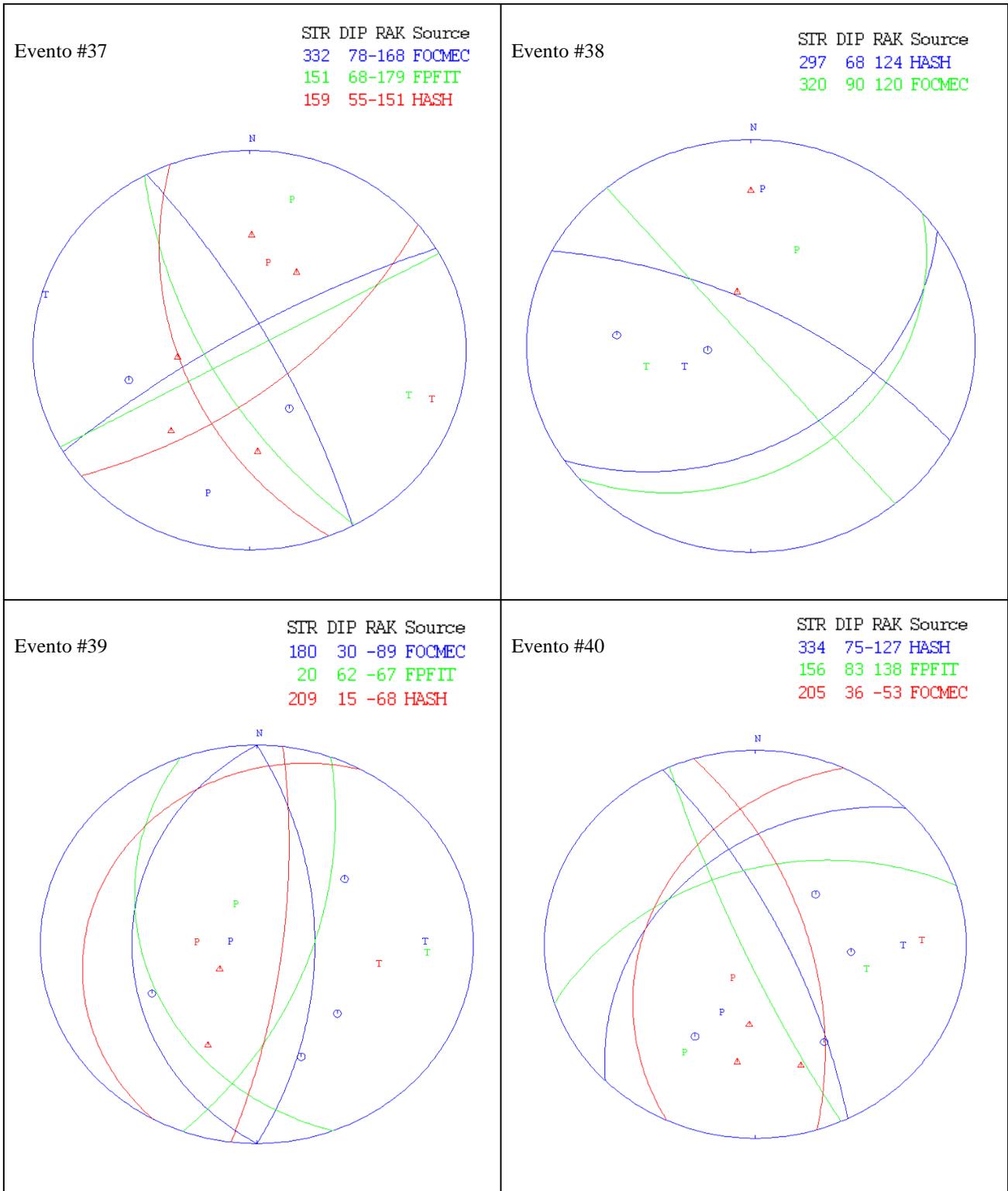


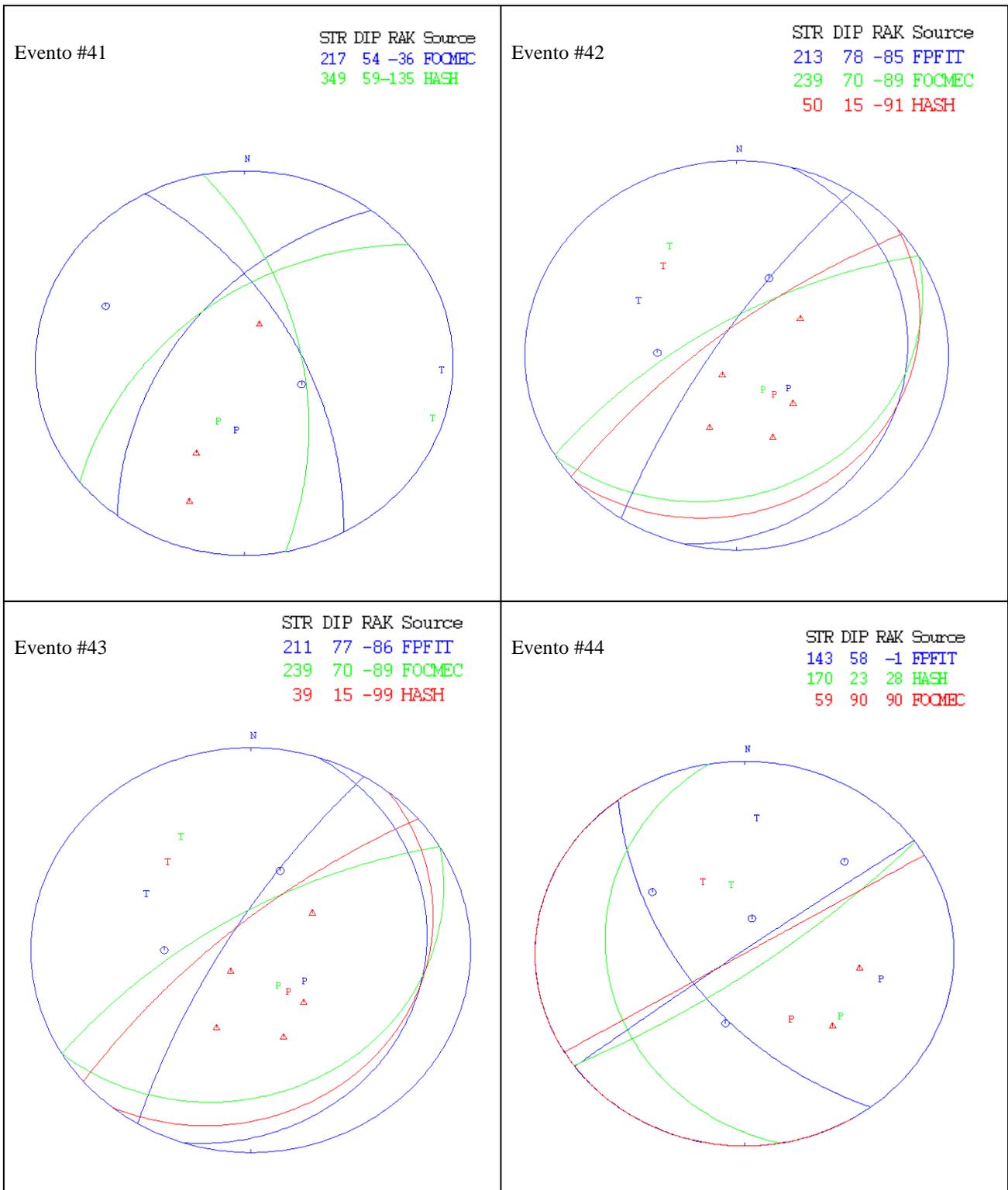












Evento #45

SIR	DIP	RAK	Source
357	29-137	FOCMEC	
18	28-123	FPFIT	
26	31-119	HASH	

